МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ISSN 2221-951X

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего *плюс*

Периодическое научное издание

Серия: Технические науки.
Информатика, вычислительная техника и управление

04(38)/2017

Пенза
ПензГТУ
2017

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ

ЖУРНАЛ

«XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс»: Периодическое научное издание. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. ун-та, 2017. – №04(38). – 178 с.

Решением Президиума ВАК при Минобрнауки России № 8/13 от 2 марта 2012 г. журнал включен в Перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Журнал зарегистрирован как периодическое печатное издание в Управлении Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций по Пензенской области ***ПИ № ТУ 58 – 00243 от 27 апреля 2015 года***

ISSN 2221-951X © ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет, 2017

Ministry of Education and Science of the Russian Federation

Penza State Technological University

ISSN 2221-951X

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL JOURNAL

"XXI century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus"

Scientific Periodical

Series: Engineering Sciences. Information Science, Computing Devices and Controling

04(38)/2017

Penza
PenzSTU
2017

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL

JOURNAL

«XXI century: resumes of the past and challenges of the present plus». Scientific periodical. – Penza: PenzSTU Publishing House, 2017. – № 04(38). – 178 p.

The journal is included in the List of reviewed scientific journals and editions for publishing principal scientific theses results approved by the Resolution of the Presidium of the Supreme Certification Commission of the Ministry of Education and Science of Russia (№ 8/13, March 2nd, 2012).

The journal is registered as periodic printed publication at the Department of the Federal Control Service for Communication, Information Technologies and Mass Communication in the Penza region

ПИ № ТУ 58 – 00243, April, 27th, 2015

ISSN 2221-951X

9 772221 951003

ISSN 2221-951X © Penza State Technological University, 2017

Содержание

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ. ОБРАБОТКА, ХРАНЕНИЕ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕМНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ
© ***И.И. Сальников,*** *Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*…… 9

ВСТРАИВАНИЕ ЦИФРОВОГО ВОДЯНОГО ЗНАКА В АУДИОФАЙЛ
© ***С.Н. Борисова****, Пензенская государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*
© ***Д.А. Федотов****, Законодательное собрание Пензенской области (г. Пенза, Россия)*…… 15

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ, ОБНАРУЖЕНИЕ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПО ДАЛЬНОСТИ В РАДИОЛУЧЕВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ ОХРАНЫ
© ***Е.А. Данилов****, Пензенский государственный технологический университет (Пенза, Россия)*…… 21

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГИПЕРТРЕЙС-МАТРИЦ В КОНТЕКСТЕ АНАЛИЗА ПРОБЛЕМЫ ИНВАРИАНТНОСТИ КОНСТРУИРУЕМЫХ ПРИЗНАКОВ К ПОВОРОТУ 3D ИЗОБРАЖЕНИЯ
© ***Н.Г. Федотов,*** *Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)*
© ***А.А. Сёмов,*** *ООО «КомХэлф» (г. Пенза, Россия)*
© ***Е.А. Крючкова,*** *Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)*…… 29

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА СВЧ-УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
© ***С.Е. Савотченко,*** *Белгородский государственный институт искусств и культуры (г. Белгород, Россия)*
© ***И.Н. Перепелкин,*** *Белгородский государственный институт искусств и культуры (г. Белгород, Россия)*
© ***Р.А. Дунаев,*** *Белгородский государственный институт искусств и культуры (г. Белгород, Россия)*…… 37

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ СОЦИАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ПОРТАЛОВ ЭЛЕКТРОННОГО УЧАСТИЯ
© ***Л.А. Видясова****, Университет ИТМО (г. Санкт-Петербург, Россия)*…. 42

АЛГОРИТМ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ НОВОГО МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ БУМАЖНЫХ ДОКУМЕНТОВ
© ***Л.С. Беккель,*** *Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Калуга, Россия)*
© ***В.Д. Шкилев,*** *Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Калуга, Россия)*…… 47

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ СТОХАСТИЧЕСКИ НАНЕСЕННЫХ МЕТОК
© ***Л.С. Беккель,*** *Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Калуга, Россия)*
© ***В.Д. Шкилев,*** *Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Калуга, Россия)*…… 54

СУММАРНО-РАЗНОСТНЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА СЛОЖНОМ НЕОДНОРОДНОМ ФОНЕ
© ***В.А. Кочкин***, *НИИ Радиоэлектронной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, Россия)*
© ***В.Ю. Лоскутов***, *НИИ Радиоэлектронной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, Россия)*…… 58

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

ВЫБОР АЛЬТЕРНАТИВ С ПОМОЩЬЮ ПРОИЗВОДЯЩЕЙ ФУНКЦИИ
© ***Т.А. Шорникова***, *Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*…… 67

НЕРЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОАГЕНТНЫМИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ
© ***М.Ю. Бабич***, *АО «НПП «Рубин» (г. Пенза, Россия)*…… 71

СТРУКТУРЫ, МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ПОСТРОЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ АДАПТИВНОГО КООРДИНАТНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
© ***Б.Л. Свистунов***, *Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*
© ***Е.А. Дементьев***, *Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*…… 79

ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ДЛЯ ПОДБОРА СИЛОВЫХ ТИРИСТОРОВ И ДИОДОВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ВКЛЮЧЕНИИ
© ***А.В. Мускатиньев,*** *Национальный исследовательский мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева (г. Саранск, Россия)*… 86

КОРОТКИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ТЕСТ ДЛЯ ОДНОГО КЛАССА СХЕМ
© ***Д.С. Романов,*** *МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)*
© ***Е.Ю. Романова****, Российский государственный социальный университет (г. Москва, Россия)*…… 91

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОБЗОР НАДЕЖНОСТИ СХЕМ, РЕАЛИЗУЮЩИХ ФУНКЦИИ МНОГОЗНАЧНОЙ ЛОГИКИ
© ***М.А. Алехина,*** *Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*
© ***А.В. Герасимова,*** *Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*…….. 94

НЕМОНОТОННАЯ СЛОЖНОСТЬ КАК ОБОБЩЕНИЕ ИНВЕРСИОННОЙ СЛОЖНОСТИ
© ***В.В. Кочергин****, МГУ имени М. В. Ломоносова* (*г. Москва, Россия*)
© ***А.В. Михайлович****, НИУ ВШЭ* (*г. Москва, Россия*)…….... 98

О НАПРАВЛЕНИЯХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДИСКРЕТНОМУ АНАЛИЗУ В ИНСТИТУТЕ МАТЕМАТИКИ СО РАН
© ***А.А. Евдокимов****, Институт математики СО РАН им. С.Л. Соболева, Новосибирский государственный университет (г. Новосибирск, Россия)*…… 105

О РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ О СУММЕ ПОДМНОЖЕСТВ МЕТОДОМ ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ
© ***Р.М. Колпаков****, МГУ им М.В. Ломоносова, Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН* (*г. Москва, Россия*)
© ***М.А. Посыпкин****, Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН* (*г. Москва, Россия*)…… 112

АЛГОРИТМЫ, УСТРОЙСТВА И ЭЛЕМЕНТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПЛИС АРХИТЕКТУРЫ FPGA
© ***И.В. Ушенина****, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*…….. 120

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ КОМПЬЮТЕРНОЙ АУДИТОРИИ ВУЗА С СИНХРОННЫМ ВРЕМЕНЕМ ДОСТУПА
© ***А.А. Воронцов****, Пензенский государственный технологический университет (Пенза, Россия)*
© ***А.Н. Пименов****, Пензенский государственный технологический университет (Пенза, Россия)*…….. 125

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВОЗМОЖНОСТЬ АППАРАТНОЙ ПОДДЕРЖКИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ ПРОЦЕССАМИ В ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ
© ***А.И. Мартышкин****, Пензенский государственный технологический университет (Пенза, Россия)*…… 132

ВОЗМОЖНЫЙ ВАРИАНТ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ АППАРАТНОГО АРБИТРА ОБЩЕЙ ШИНЫ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ
*© **А. И. Мартышкин**, Пензенский государственный технологический университет (Пенза, Россия)*..... 139

СОБЫТИЙНАЯ СИСТЕМА СИНХРОНИЗАЦИИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ MICROBLAZE
*© **А.В. Бурмистров**, Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр «Атлас» (г. Пенза, Россия)*
*© **И.И. Сальников**, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*..... 145

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

СЕМАНТИЧЕСКИЕ СЕТИ ФРЕЙМОПОДОБНОГО ВИДА КАК СПОСОБ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ДОКУМЕНТОВ
*© **Д.В. Блувштейн,** Управление Федерального казначейства по Костромской области (г. Кострома, Россия)*..... 150

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ И ВАРИАНТЫ МАКЕТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СБОРОЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ
*© **Р.А. Бурнашев**, Казанский (Приволжский) федеральный университет (г. Казань, Россия)*
*© **М.А.А. Аль-Саеди**, Казанский (Приволжский) федеральный университет (г. Казань, Россия)*
*© **Д.Н. Галанин**, Казанский (Приволжский) федеральный университет (г. Казань, Россия)*
*© **В.О. Георгиев**, Казанский (Приволжский) федеральный университет (г. Казань, Россия)*..... 158

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ – ПЛАТФОРМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ОПОРЫ ИЗЫСКАТЕЛЬСКИМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ
*© **Н.А. Котов,** Университет ИТМО (г. Санкт-Петербург, Россия)*
*© **В.И. Погорелов**, Университет ИТМО (г. Санкт-Петербург, Россия)*.. 165

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМИТАТОРА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ПИЛОТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
*© **И.А. Прошин,** Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*
*© **В.Н. Прошкин,** Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*
*© **Э.А. Магомедова,** Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*..... 172

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ. ОБРАБОТКА, ХРАНЕНИЕ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.89
ББК 30

ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕМНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

© ***И.И. Сальников,*** *Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

PROBLEMS OF SHAPING OF A VOLUMETRIC IMAGE

© ***I.I. Salnikov,*** *Penza State Technological University (Penza, Russia)*

В статье рассмотрены проблемы формирования объемного изображения, воспринимаемого человеком при наблюдении окружающего мира. Отмечаются основные этапы в методах формирования объемных изображений: использование теней в изобразительном искусстве; разделение двух каналов наблюдения по цвету; разделение двух каналов наблюдения по поляризации; разделение двух каналов наблюдения по пространству; голография как метод регистрации и формирования волнового фронта для сохранения объемности изображения. Отмечаются 3 основные проблемы разработки устройств регистрации и формирования объемных изображений: размеры элементов; проблема преобразования пространственного распределения фазы предметной волны в электрический сигнал; модуляция светового потока в соответствии с записанной информацией при формировании волнового фронта.

Ключевые слова: объемное изображение, регистрация волнового фронта, пространственное распределение фазы волны, голография

In a paper the problems of shaping of a volumetric image perceived by the man at observation of the enclosing world are considered. The milestones in methods of shaping of volumetric images are marked: use of shadows in fine art; separation of two channels of observation on colour; separation of two channels of observation on polarization; separation of two channels of observation on space; a holography as a method of filing and shaping of a wavefront set for preservation of an extensionality of an image. 3 basic problems of development of devices of filing and shaping of volumetric images are marked: sizes of the elements; a problem of transformation of space distribution of a phase of an object wave in an electrical signal; modulation of a light stream in the correspondence with a noted information at shaping of a wavefront set.

Key word: volumetric image, filing of wavefront set, space distribution of phase of wave, holography

По своей природе человек наделен уникальной способностью видеть окружающий мир, при этом воспринимать информацию не только о яркости, цвете, размерах увиденного, но и о пространственной структуре объектов наблюдения. Эта важная характеристика определяется наличием у человека двух глаз, разнесенных по горизонтали на некоторое расстояние.

Глаза человека как оптические приборы фиксируют изображения в виде плоских картин пространственного распределения яркости и цвета на сетчатке глаз, разнесенных по горизонтали на незначительный пространственный угол, но достаточный для формирования эффекта объемности в мозгу человека.

В работах [1,2] говорилось об информационных потребностях человека, среди средств реализации которых созерцание окружающего мира, запоминание и формирование изображений играет существенную роль. При этом с давних

времен человеку в своей деятельности хотелось формировать полноинформационные изображения, одним из характерных свойств которых является *объёмность*. Однако для реализации этой информационной потребности до сегодняшнего времени не было эффективных средств реализации.

Отметим основные этапы в развитии *методов формирования объемных изображений*.

1. Использование теней в изобразительном искусстве. Синтез изображений в виде художественного холста с помощью красок явился одним из первых средств реализации информационной потребности человека, в которых проявилось стремление человека сформировать не просто изображение объектов окружающего мира, но и передать их объемность в плоскости картины. Для получения эффекта объемности художники использовали и используют изображения *теней*, которые при субъективном восприятии дают в той или иной степени эффект объемности. Естественно, реальную объемность изображений обычными средствами получить невозможно, но субъективное восприятие объемности изображений вполне достигалось.

2. Разделение двух каналов наблюдения по *цвету*.

Данный метод формирования объемного изображения заключается в довольно примитивном разделении двух каналов независимого наблюдения с помощью цветовых фильтров, например красного и синего. Этот метод пригоден только при *синтезе* изображений, например при изучении стереометрии, когда надо показать объемность геометрических фигур.

Наблюдателю предлагается изображение фигур на плоскости, выполненное в двух цветах. Причем, в данных картинках используется пространственное смещение, которое при обычном восприятии представляет собой хаотическое изображение. Но стоит надеть очки с *цветофильтрами*, как мы сразу видим объемное статическое изображение фигур. То есть, используя одновременное наблюдение плоских изображений по двум каналам с разделением по цвету, субъективно мы воспринимаем объемное изображение. Этот метод пригоден только для синтезируемых изображений и имеет существенный недостаток – теряется информация о таком важнейшем параметре изображения как цвет.

Таким образом, для формирования объемного изображения необходимо наличие двух информационных каналов формирования изображений, сдвинутых в пространстве на некоторый телесный угол.

3. Разделение двух каналов наблюдения по *поляризации*.

Из физики известно, например [3], что электромагнитные (ЭМ) волны как поперечные волны характеризуются *поляризацией*, то есть пространственной ориентацией вектора электрического поля.

Поляризационный эффект заключается в том, что некоторые материалы, например кристаллы полевого шпата, пропускают ЭМ-волны только с одной ориентацией плоскости поляризации и гасят ЭМ-волны с ортогональной поляризацией. Этот эффект был положен в основу раздельного наблюдения двух каналов изображений, сдвинутых на некоторый пространственный угол, с помощью поляроидных очков, когда каждый глаз человека воспринимает изображения в виде световых волн с взаимно ортогональной поляризацией.

Еще в 70-е годы XX века этот эффект был положен в основу развития массовой сети стереокинотеатров, когда при входе зрителям выдавались поляроидные очки, а на экран проецировалось с двух кинопроекторов изображения в световых потоках со взаимно ортогональной поляризацией. Это направление

и сейчас с успехом используется, но в наше новое время поменялось только название – стали называть «3*D*-изображения», а физический принцип остался прежним.

Метод поляризационного разделения каналов наблюдения изображений для получения эффекта объемности в наше время с успехом применяется не только в кино, но и в телевидении, а также в тех информационных системах, где можно использовать регистрацию двух плоских изображений оптическими системами, смещенными в пространстве относительно друг друга на некоторое расстояние. При воспроизведении используется либо одновременное формирование изображений от двух источников как в стереокино, либо переключение каналов во времени при формировании изображений с одного источника, как в стереотелевидении.

Недостатком подобного метода формирования объемного изображения является необходимость использования *поляроидных очков* с ортогональной поляризацией для формирования двух раздельных каналов наблюдения.

4. Разделение двух каналов наблюдения *по пространству*.

Современные информационные технологии для получения эффекта объемности позволяют формировать два независимых изображения либо путем чтения из памяти записанных реальных изображений, либо в виде синтезированной графики. При этом воспроизведение выполняется одновременно, с использованием *специального шлема*, в котором имеются два плоских индикатора раздельно и независимо друг от друга воспроизводящих для каждого глаза человека изображения. То есть используется разделение двух каналов наблюдения по пространству.

Такой шлем фактически является индивидуальным средством формирования объемного изображения. Использование подобного шлема хотя и дает значительный изобразительный эффект, но все же весьма обременительно.

Одним из направлений развития этого метода может служить непосредственное воздействие принимаемого изображения на зрительные органы человека, минуя глаза. Гипотетически это представляется как «вшивание» некоторого устройства человеку и «подключение» его к зрительной нервной системе.

В вышеперечисленных методах фактически отсутствует формирование действительного объемного изображения, а используются плоские изображения, сдвинутые на некоторый пространственный угол и наблюдаемые двумя глазами человека с разделением каналов наблюдения либо по цвету, либо по поляризации, либо по пространству. Для этих методов формирование объемного изображения выполняется *субъективно* в мозгу человека.

А как можно регистрировать объемность изображений и формировать объемные изображения не прибегая к субъективности восприятия. Возможно ли существование подобного метода и средства реализации его в виде некоторого устройства? Наиболее близким методом, отвечающим поставленным условиям, является *голографический* метод.

5. Голография как метод регистрации и формирования волнового фронта для сохранения объемности изображения. Метод голографии был разработан в 1947 г. Д. Габором и описан в многочисленной литературе, например в [4,5]. За разработку столь уникального метода регистрации и формирования объемного изображения, исключая субъективное восприятие мозгом человека, Д. Габору была присуждена Нобелевская премия в 1971 г.

Метод *голографии* основан на регистрации интерференционной картины ЭМ-волн объектного и *плоского* волновых фронтов. ЭМ-волна с плоским

волновым фронтом вводится для преобразования фазового распределения объектного волнового фронта, несущего информацию о наблюдаемом изображении, в амплитудное распределение интерференционной картины.

Возникает естественный вопрос, если информация об объемности изображения наблюдаемых объектов заключается в фазовом пространственном распределении волнового фронта, то и регистрировать и формировать надо непосредственно пространственное распределение фазы волнового фронта. Возможно ли это в современных условиях и какие проблемы возникают при этом.

В общем виде ЭМ-волну принято описывать в следующем виде [6]:

$$\overline{E}(x,y,t) = \overline{E_m}(x,y)\sin\left[2\pi f_0 t + \varphi(x,y)\right] \qquad (1)$$

где $\varphi(x,y)$ – фазовое пространственное распределение объектного волнового фронта, $f_0 = \nu$ – несущая частота ЭМ-волны, например для длины волны He-Ne лазера $\lambda_0 = 632{,}8$ нм несущая частота равна $f_0 = \frac{c}{\lambda_0} \approx 474$ ТГц.

Исходя из (1) длине волны λ_0 соответствует фазовый сдвиг $\varphi = 2\pi$ рад. Для прямой регистрации пространственного фазового распределения волнового фронта необходим материал с разрешающей способностью менее 30 нм для красного цвета и менее 20 нм для синего цвета, что соответствует 10 отсчетам на полупериоде волнового процесса. При этом от материала требуется регистрация элементов объектного волнового потока с указанной разрешающей способностью, а также требуемый материал должен обладать возможностью модулировать световой поток с данной разрешающей способностью при формировании объемного изображения. Автору подобный материал с подобными свойствами не известен.

А как же в голографии удалось обойти это обстоятельство? Ответ заключается в использовании преобразования фазового пространственного распределения в амплитудное и в регистрации интенсивности светового потока интерференционной картины.

Во времена появления голографии в качестве материалов для регистрации ЭМ-волн оптического диапазона широко использовались фотографические материалы, особенностью которых является регистрация интенсивности светового потока, причем элементами регистрации являлись зерна серебра, которые при соответствующей химической обработке чернеют, пропорционально *интенсивности* падающего света.

В методе голографии используется преобразование фазового распределения объектной волны в амплитудное распределение путем введения *опорной волны* с плоским волновым фронтом. Сформированная интерференционная картина регистрируется в виде пространственного распределения интенсивности в виде яркости изображения на фотографическом материале. То есть регистрируется *голограмма*, которая хранит в себе информацию о фазовой структуре объектной волны и как следствие, об объемности изображения.

Для формирования или восстановления записанного изображения голограмма освещается плоским волновым фронтом, наблюдается дифракция

светового потока на яркостной картине голограммы и формируется волновой фронт объектной волны, который несет информацию о пространственном расположении элементов объекта наблюдения.

Далее этот сформированный волновой фронт можно наблюдать человеку с полным эффектом объемности изображения не прибегая к бинарному разделению каналов наблюдения.

Требования к материалу при регистрации голограммы и восстановления объектного волнового фронта существенно уменьшаются, в связи с чем, в 70-е годы XX века и проводились интенсивные исследования в этом направлении и были достигнуты определенные успехи с использованием фотографических материалов.

Недостатком метода голографии, который не позволил создать эффективные устройства регистрации и формирования объемных изображений явился, по мнению автора, *аналоговый подход* к тем пространственным преобразованиям, которые характеризуют метод голографии.

Только *цифровые методы*, базирующиеся на средствах вычислительной техники, могут иметь перспективы успешного развития средств регистрации и формирования объемных изображений [6,7].

Далее приведем основные характеристики процессов регистрации и формирования объемных изображений и сформулируем основные требования к системам регистрации и формирования объемных изображений с учетом достижений информационных технологий.

6. Регистрация и формирование объемных изображений пространственно распределенных объектов в волновых полях.

Для прямой регистрации и формирования объемного изображения требуется *записать* при регистрации пространственное распределение фазового сдвига волнового фронта объектной волны и сформировать волновой фронт при формировании объемного изображения.

Наиболее эффективным средством регистрации и формирования пространственных картин является *матричная структура*, которая с помощью средств вычислительной техники позволяет в дискретной форме управлять элементами пространственного распределения фазы волнового как при регистрации объемного изображения, так и при формировании его.

Следует отметить 2 варианта реализации подобного формирователя волнового фронта с заданным пространственным распределением фазового сдвига:

- формирование волнового фронта по результату *записи* исходного волнового фронта;

- формирование волнового фронта на основе *синтеза* пространственного распределения сдвига за счет использования соответствующего программного обеспечения формирования пространственной картины распределения фазового сдвига.

На начальном этапе можно говорить о плоских регистрирующих матрицах к каждому элементу которой должен быть доступ со стороны управляющей вычислительной структуры, которая формирует волновой фронт в режиме синтеза объемного изображения.

Учитывая современные возможности информационных технологий, базой которых являются современные вычислительные средства, следует отметить, что структура регистрации пространственного распределения фазового

сдвига должна быть дискретизирована и в каждый элемент должен быть введен элемент управления.

Таким образом, для прямой записи и формировании объемного изображения требуются матричная структура:

– с элементами размером менее 50 нм;

– с возможностью регистрации фазового сдвига δφ в режиме записи;

– в режиме формирования ВФ каждый элемент должен вносить фазовый сдвиг в исходное облучение в виде плоского волнового фронта или излучать в пассивном, либо активном режиме ЭМ-фотоны. При этом д.б. частота одинаковая, а начальная фаз или фазовый сдвиг соответствовать записи.

Основными режимами подобного гипотетического устройства формирования объемного изображения должны бать:

– регистрация фазового распределения волнового фронта;

– формирование ВФ.

Отметим в заключении 3 основных проблемы разработки устройств регистрации и формирования объемных изображений.

1. Размеры элементов. С учетом достижений в области технологии производства интегральных схем, когда достигнуты технологические нормы разрешающей способности 15-25 нм, становится вполне реальным создать матричные структуры для регистрации и формирования объемных изображений пространственно распределенных объектов в электромагнитных волнах.

2. Преобразование пространственного распределения фазы предметной волны в электрический сигнал, характерный для средств обработки на основе вычислительных структур – регистрация, запоминание, хранение. Для этого необходима реализация интерференции с опорным волновым фронтом. Для решения этой проблемы наиболее перспективным является использование напыляемых волоконно-оптических структур.

3. Модуляция светового потока в соответствии с записанной информацией.

Список литературы

1. *Сальников И.И. Движущие силы развития средств удовлетворения информационных потребностей человека. // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс: Научно-методический журнал. Пенза: Пенз. гос. технол. ун-т. – 2014. – №03(19). – С. 11-15.*
2. *Сальников И.И. Интеграционные процессы в развитии средств реализации информационных потребностей человека на современном этапе. //XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс: Научно-методический журнал. Пенза: Пенз. гос. технол. ун-т. – 2014. – №03(19). – С. 16-24.*
3. *Ландсберг Г.С. Оптика. – М., Наука, 1976. – 928 с.*
4. *Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. – М., Наука, 1971. – 616 с.*
5. *Юу Ф.Т.С. Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию. – М., Советское радио, 1979. – 304 с.*
6. *Кондратенков Г.С. Обработка информации когерентными оптическими системами. – М., Советское радио, 1972. – 208 с.*
7. *Кочкин В.А. Метод пространственной фокусировки лазерного излучения по оценке текущего состояния турбулентной атмосферы. // XXI век: итоги*

прошлого и проблемы настоящего плюс: Научно-методический журнал. Пенза: Пенз. гос. технол. академия. – 2015. – №03(25). – С. 41-51.

8. *Кочкин В.А. Автоматическое обнаружение малоразмерных динамических объектов в оптико-электронных системах. // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс: Научно-методический журнал. Пенза: Пенз. гос. технол. академия. – 2012. – №05(09). – С. 32-40.*

УДК 681.3.067
ББК 30

ВСТРАИВАНИЕ ЦИФРОВОГО ВОДЯНОГО ЗНАКА В АУДИОФАЙЛ

© **С.*Н. Борисова***, *Пензенская государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*
© ***Д.А. Федотов***, *Законодательное собрание Пензенской области (г. Пенза, Россия)*

EMBEDDING OF THE DIGITAL WATERMARK IN AUDIO

© ***S.N. Borisova***, *Penza State Technological University (Penza, Russia)*
© ***D.A. Fedotov***, *Legislative Assembly of the Penza Region (Penza, Russia)*

Статья посвящена исследованию методов встраивания цифрового водяного знака *(ЦВЗ*) в аудиофайлы. Предложена методика формирования ЦВЗ и методика его внедрения в аудиофайлы. Внедренный ЦВЗ позволит защитить аудиофайл от подмены и модификации, так как он учитывает содержимое и размер файла. Разработанная методика формирования ЦВЗ позволит осуществить быстрый поиск по файлам в больших базах данных

Ключевые слова: стеганография, скрытая информация, цифровой водяной знак, идентификационная метка

Article is devoted to a research of methods of embedding of digital watermark (DWM) in audio files. The technique of formation of DWM and a technique of its implementation in audio files is offered. The implemented DWM will allow to protect an audio file from substitution and modification as it considers contents and file size. The developed technique of formation of DWM will allow to realize fast search in files in big databases.

Key words: steganography, hiding information, digital watermark, identification mark

E-mail: snl_simona@mail.ru

Цифровой водяной знак – технология, созданная для защиты авторских прав на мультимедийные файлы, защиты от несанкционированного копирования подобных файлов [2]. ЦВЗ – одно из направлений стеганографии. Слово «стеганография» имеет греческие корни (στεγανος – «скрытый» и γραφω – «пишу», буквально «тайнопись»). Тайнопись могла быть реализована различными способами. Общим признаком этих способов является то, что скрываемое сообщение встраивается в другой объект (контейнер), не привлекающий внимания [1].

Задачу встраивания выполняют специальные стегосистемы (рисунок 1). Перед помещением в контейнер ЦВЗ преобразуется к подходящему виду в прекодере.

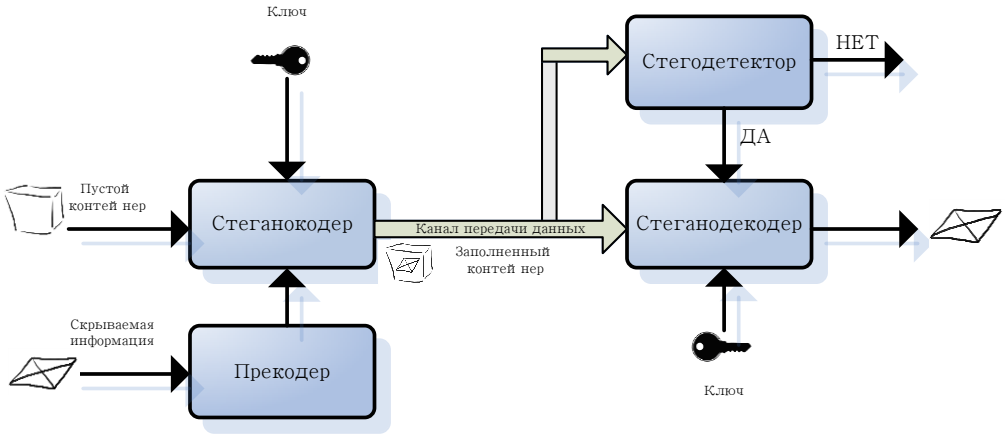


Рисунок 1 – Модель стегосистемы

С появлением компьютеров стала развиваться компьютерная стеганография. Основное назначение компьютерной стеганографии – скрытная передача данных. Она включает в себя множество методов, использующих компьютерные форматы данных, особенности файловой системы, неиспользуемые сектора и т. д. Однако они отличаются низкой надёжностью и производительностью. Наибольшее распространение получили методы, использующие цифровую обработку сигналов. Данное направление получило название — цифровая стеганография. Оно имеет несколько областей использования (рисунок 2) [3].

Рисунок 2 – Области применения цифровой стеганографии

Технологии встраивания ЦВЗ могут быть совершенно различными. Скрытие данных в звуковых сигналах является особенно перспективным, поскольку слуховая система человека (ССЧ) работает в сверхшироком динамическом диапазоне. При внедрении информации в аудиосигналы, необходимо придерживаться определенных требований [4]:

- скрываемая информация должна быть стойкой к наличию различных окрашенных шумов, сжатию с потерями, фильтрованию, аналогово-цифровому и цифро-аналоговому преобразованиям;

- скрываемая информация не должна вносить в сигнал искажения, воспринимаемые системой слуха человека;

- попытка удаления скрываемой информации должна приводить к заметному повреждению контейнера (для ЦВЗ);

- скрываемая информация не должна вносить заметных изменений в статистику контейнера.

На практике рассматривалась задача внедрения ЦВЗ в аудиозаписи и стенограммы мероприятий Законодательного собрания области. На основании аудиозаписи и стенограммы составляется протокол мероприятия.

В связи с большим объёмом архива аудиозаписей и участившимися атаками вирусов шифровальщиков и другими угрозами безопасности информации, вводятся дополнительные меры защиты цифровой информации:

– ограничение доступа к электронному архиву данных и физическим носителям информации ограниченного количества уполномоченных сотрудников организации;

– внедрение в аудиофайл стенограммы мероприятия специального цифрового водяного знака (ЦВЗ).

Цифровой водяной знак (ЦВЗ) в данном случае является электронной меткой, которая внедряется в определенный фрагмент аудиофайла и является числовым выражением определенных характеристик самого аудиофайла, а также мероприятия, на котором проводилась аудиозапись.

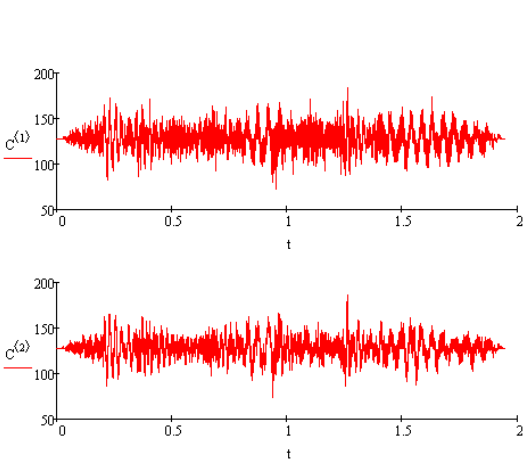
Для внедрения скрываемой информации в аудиосигналы можно использовать методы, применимые в других видах стеганографии. Например, можно внедрять информацию, замещая наименее значимые биты (все или некоторые). Или можно строить стегосистемы, основываясь на особенностях аудиосигналов и системы слуха человека.

Кодирование младших разрядов является простейшим способом внедрить конфиденциальные данные в иные структуры данных. Используя звуковой сигнал, путем замены НЗБ каждой точки осуществления выборки, представленной двоичной последовательностью, можно зашифровать значительный объем информации.

Встраивание осуществляется в системе MathCAD. Для получения информации относительно WAV-файла используется встроенная функция GETWAVINFO («файл»). Указанная функция возвращает четырехэлементный вектор с информацией о файле, который выступил ее аргументом. Первый элемент вектора характеризует количество каналов; второй – частоту дискретизации (в герцах); третий – количество бит, которыми кодируется один отсчет (определяющее количество уровней квантования); четвертый – среднее количество бит в секунду, которое должен обрабатывать аудиопроигрыватель, чтобы воспроизводить этот файл в реальном времени. Пользуясь полученной информацией, можно найти временной вектор, отвечающий амплитудам аудиосигнала в отдельные отсчеты дискретизации. Данные амплитуды могут быть считаны с помощью функции READWAV ("файл"), возвращающей массив, каждый столбец которого представляет собой отдельный канал (так, например, для моносигнала массив будет содержать только 1 столбец, для стерео – 2 и т.д.),

а каждая строка массива отвечает моменту времени, который определяется номером отсчета и частотой дискретизации сигнала.

На рисунке 3,а представлен результат выполнения команды в виде временных диаграмм, а на рисунке 3,б – в виде массива квантованных амплитуд с 2000-го по 2020-й элемент.



C := READWAV("C.wav")

i := 2000.. 2020

$C_{i,1}$ =	$C_{i,2}$ =
127	131
127	129
128	128
128	128
127	128
127	127
127	126
128	125
131	125
132	125
132	125
131	125
130	126
130	126
129	127
...	...

а) б)

Рисунок 3 – Результат выполнения команды READWAV

Сам процесс встраивания информации аналогичен тому, который использовался при использовании изображения в качестве контейнера, то есть в каждом значении амплитуды наименьший значащий бит заменяется на бит сообщения. Временная диаграмма для модифицированного контейнера представлена на рисунке 4.

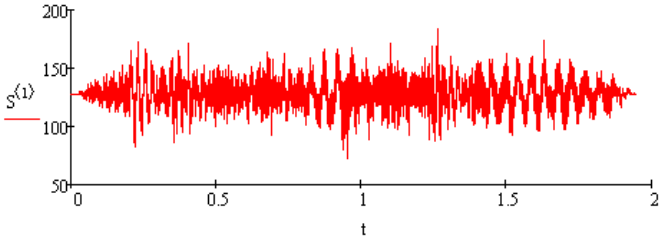


Рисунок 4 – Временная диаграмма модифицированного канала контейнера

Разница между исходным и модифицированным каналом представлена на рисунке 5. На рисунке видно, что изменения вносились в конец файла.

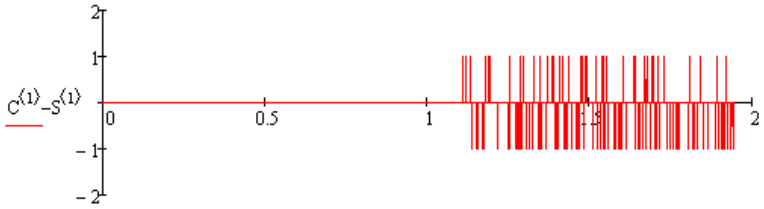


Рисунок 5 – Разница между исходным и модифицированным каналом

Теперь оценим искажения, вносимые при встраивании информации в аудиофайлы. Для этого рассчитаем пиковое соотношение сигнал/шум для сообщений различной длины *PSNR* и среднеквадратическую ошибку *NMSE* согласно правилам, описанным в [1]. При увеличении объема скрываемого сообщения значение *PSNR* уменьшается, в то время как значение среднеквадратической ошибки возрастает.

При втором способе формирование и внедрение ЦВЗ осуществлялось с помощью программы аудио-редактора *Adobe Audition* версии 3.0. Стандартная функция программы – «Генератор двухтональных многочастотных аналоговых сигналов (англ. *Dual-Tone Multi-Frequency, DTMF*)» – позволяет сгенерировать на основе заданного числового выражения ЦВЗ.

Встраиваемое числовое выражение определяется на основе табл. 1.

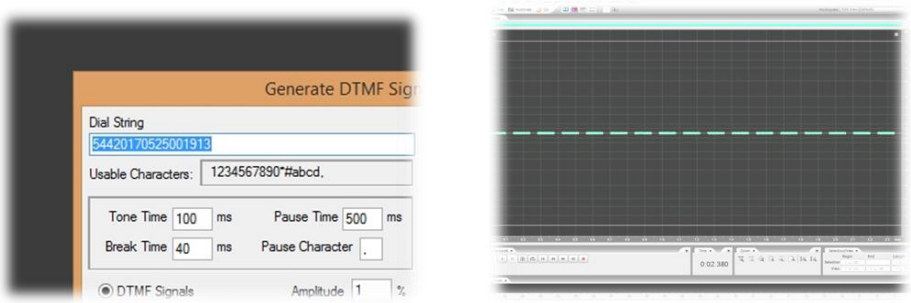
Перед встраиванием необходимо выполнить предварительные настройки сигнала в программе *Adobe Audition* 3.0 с помощью пункта меню – DTMF Signals.

Частота дискретизации сигнала выбирается в 44100 Гц, тип – Mono, 16-bit.

В открывшемся окне *Generate DTMF Signals* в информационном поле *Dial String* необходимо указать числовое выражение, в нашем случае это – 54420170525001913, и амплитуду сигнала (англ. *Amplitude*) – 1% (рисунок 6,а). В результате получаем требуемый сигнал – ЦВЗ (рисунок 6,б).

Таблица 1 – Структура внедряемого ЦВЗ

№ созыва	№ мероприятия		Год				Месяц		День		Часы		Минуты		Секунды	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5	4	4	2	0	1	7	0	5	2	5	0	0	1	9	1	3



а) б)

Рисунок 6 – Создание ЦВЗ

Процесс внедрения ЦВЗ в аудиофайл осуществляется с помощью стандартного режима программы *Adobe Audition* 3.0 – «Мультиканальный режим». Перед встраиванием необходимо подготовить аудиофайл стенограммы. Для этого аудиофайл-контейнер открывается в одноканальном режиме работы программы и выделяется фрагмент в начале файла длительностью 10 секунд. Выделенный

диапазон очищается командой «Тишина», что не меняет общей продолжительности файла.

После перевода программы в мультиканальный режим «Мультиканальный режим» необходимые аудиофайлы переносятся из левого поля программы в правое поле в следующем порядке: *Track* 1 – исходный аудиофайл, *Track* 2 – ЦВЗ (внедряемая электронная метка) и перемещаются к нулевой точке отсчета. Завершается процесс внедрения ЦВЗ в аудиофайл путем объединения аудиофайлов в один смешанный с встроенным ЦЗЗ с помощью функции смешивания аудиофайлов (*File – Export – Audio Mix Down*).

Процесс идентификации ЦВЗ в аудиофайле осуществляется следующим образом. В аудиофайле с ЦВЗ очищается правый канал для начального фрагмента интервалом 10 секунд. После этого с помощью программы «*DTMF Tone Decoder*» новый файл сканируется и ЦВЗ идентифицируется в аудиофайле. Полученное числовое выражение совпадает с исходными данными (рисунок 7).

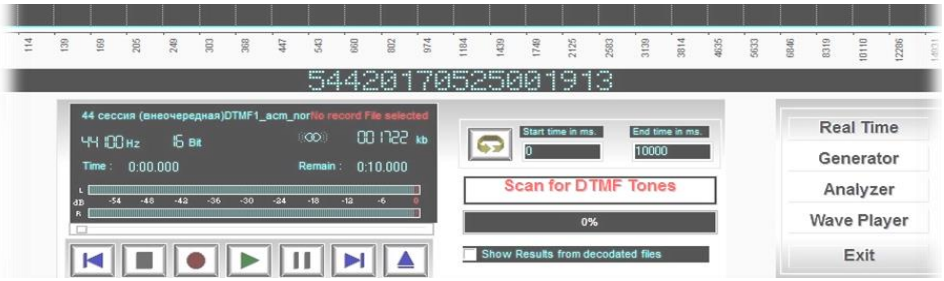


Рисунок 7 – Идентификационная метка (ЦВЗ)

Таким образом, рассмотренные методы позволяют встроить ЦВЗ в аудиофайл без потери его качества и незаметно для пользователя. Внедренный ЦВЗ позволит защитить файл от подмены и модификации, так как он учитывает содержимое и размер файла. При модификации файла ЦВЗ не будет соответствовать модифицированному файлу, а при его подмене будет отсутствовать. Кроме того, предложенная методика формирования ЦВЗ позволит осуществить быстрый поиск по файлам в больших базах данных, что является актуальным для рассматриваемой области – хранения архива аудиозаписей созывов Законодательного собрания Пензенской области.

Список литературы

1. *Борисова С.Н., Боброва Е.М. Стеганографические методы встраивания информации // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс: Научно-методический журнал. Пенза: Пенз. гос. технол. академия. – 2011. – No 3. – С. 18-23.*
2. *Борисова С.Н. Методы защиты мультимедийных файлов от несанкционированного копирования и распространения в сети Интернет// XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс: Научно - методический журнал. Пенза: Пенз. гос. технол. академия. – 2015. – No 3(25). Т.1. – С. 104-109.*
3. *Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стеганография. – М.: Солон-Пресс, 2002. – 272 с.*
4. *Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. «Компьютерная стеганография. Теория и практика.» – «МК-Пресс», 2006. – 288 с.*

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ, ОБНАРУЖЕНИЕ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

УДК 621.396.96
ББК 32

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПО ДАЛЬНОСТИ В РАДИОЛУЧЕВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ ОХРАНЫ

© ***Е.А. Данилов****, Пензенский государственный технологический университет (Пенза, Россия)*

APPLICATION OF WAVELET-TRANSFORMATION FOR INCREASE THE RANGE RESOLUTIONIN RADIORAYSTECHNICAL MEANS OF GUARD

© ***E.A. Danilov****, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

В статье рассмотрен известный метод формирования биений, используемый в радиолучевых системах охраны и его недостатки. А также рассмотрен способ улучшения тактико-технических характеристик радиолучевой системы охраны при использованиивейвлет-преобразования. Выполнено нахождение аналитического выражения для определения длительности отклика вейвлет-преобразования. Показано, что в радиолучевой системе охраны можно улучшить разрешающую способность по дальности при использовании дополнительной обработки на базе вейвлет преобразования.

Ключевые слова: техническое средство охраны, средство обнаружения, сигнальный процессор, вейвлет-преобразование, ЛЧМ, ПЛИС, БПФ, ОБПФ

The article describes the method of improving the performance characteristics of radioray guard system using the pulse phase method. Achieved finding analytical expression to select the frequency for a given length of the detection zone. It is shown that in radioray guard system can switch from continuous to pulse emission.

In the article the classical method of beat formation, used in radioray guard system and his shortcomings are considered. And also a method for improving the tactical and technical characteristics of the radioray guard system with the use of wavelet transform is considered. Performing an inheritance of an analytic expression to determine the response time of a wavelet transform. It is shown that in the radioray guard systemit is possible to improve the resolving power over the range when used before processing based on the wavelet-transform.

Key words: technical means of guard, detection means, signal processor, wavelet-transformation, linear FM, FPGA, FFT, IFFT

E-mail: EvgenyDplus@mail.ru

Усиление террористической угрозы как по отношению к государственным объектам, так и по отношению к личности, которое наблюдается в настоящее время, приводит к увеличению роли технических средств охраны (ТСО), которыми оборудуются объекты, а также периметры и подходы к ним. Для обнаружения и классификации нарушителя (Н) в охраняемой зоне в ТСО используется широкий спектр физических эффектов, проявляющихся во взаимодействии нарушителя с волнами, распространяющимися в различных средах. Наибольшее распространение в ТСО получили электромагнитные (ЭМ) волны дециметрового,

сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Радиолучевые ТСО (РЛТСО), работающие в этих диапазонах частот, мало подвержены влиянию погодных условий, и обладают удовлетворительной разрешающей способностью по пространственным размерам, характерным для человека-нарушителя.

Среди большого количества методов обнаружения и определения параметров удаленных объектов с помощью ЭМ-волн существуют методы обнаружения и измерения дальности, основанные на использовании сигналов с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ).

Метод измерения дальности на основе формирования биений. Для однопозиционной РЛТСО, реализующей данный метод обнаружения нарушителя, в пространство излучается периодический сигнал с ЛЧМ (рисунок 1,а). Принимаемый сигнал, отраженный от нарушителя, находящегося на дальности $D_{\text{Н}}$, будет запаздывать на время $t_З = 2D_{\text{Н}} / c$, где c – скорость распространения ЭМ-волн в свободном пространстве.

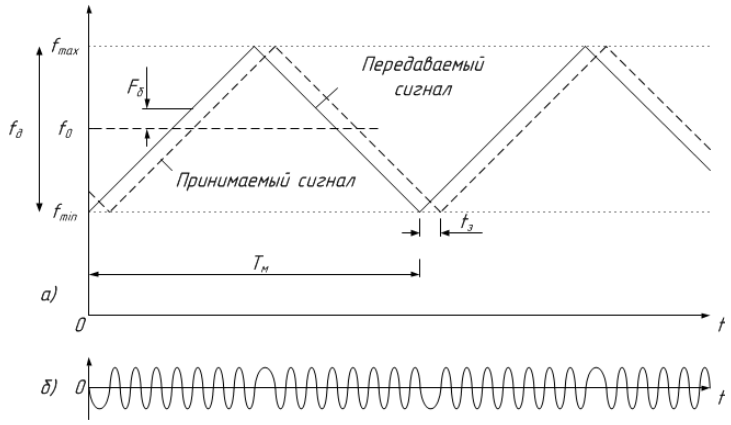


Рисунок 1 – Сигнал с ЛЧМ, используемый в частотных РЛТСО (а), и формируемые биения (б)

В результате смешения этих сигналов в синхронном детекторе образуется биение (рисунок 1,б), частота которого будет определяться временем запаздывания, то есть пропорционально дальности до нарушителя:

$$F_{\text{б}} = t_{\text{з}} \frac{df_{\text{п}}}{dt} = \frac{2df / dt}{c} D_{\text{Н}}. \qquad (1)$$

С учетом линейного закона изменения частоты ЛЧМ-колебаний частота биений будет равна:

$$F_{\text{б}} = \frac{2D_{\text{Н}} \cdot (f_{\max} - f_{\min})}{c \cdot T_M} = \frac{2D_{\text{Н}} \cdot f_d}{c \cdot T_M}, \qquad (2)$$

где f_d, T_M – девиация частоты и период модуляции.

На рисунке 2 представлена структурная схема РЛТСО, реализующая частотный метод обнаружения Н и измерения дальности. Микроконтроллер (МК) формирует периодическую импульсную последовательность с заданным периодом $T_{\text{М}}$, которая преобразуется в линейно-изменяющееся напряжение (ЛИН).

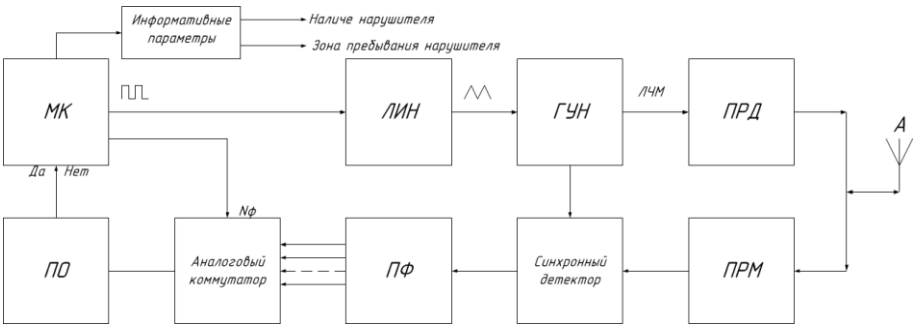


Рисунок 2 – Структурная схема однопозиционной РЛТСО с ЛЧМ-сигналом

Генератор, управляемый напряжением (ГУН), формирует высокочастотные колебания с ЛЧМ. Передающее устройство (ПРД) представляет собой широкополосный усилитель мощности, обеспечивающий заданную мощность ЭМ-колебаний, подводимых к передающей антенне (А).

Приемное устройство (ПРМ) представляет собой корректирующий усилитель высокой частоты, синхронный детектор формирует биения. Для обнаружения нарушителя и определения дальности применяется набор полосовых фильтров (ПФ), перекрывающих диапазон анализируемых частот $F_{\text{б,max}} - F_{\text{б,min}}$. Если полоса каждого ПФ равна $\Delta F_{\text{ПФ}}$, то их число должно быть равным:

$$n_{\text{ПФ}} = (F_{\text{б,max}} - F_{\text{б,min}}) / \Delta F_{\text{ПФ}} . \qquad (3)$$

С помощью аналогового коммутатора опрашивается состояние каждого ПФ. Выход коммутатора подключен к пороговому обнаружителю (ПО), который используется для регистрации факта появления нарушителя, и который выносит решение – да/нет. Номер полосового фильтра $N_{\text{ПФ}}$ определяет частоту биений и позволяет определить диапазон дальностей, в пределах которого находится Н.

Разрешающая способность по дальности. Два объекта можно различить, если соответствующие им частоты различаются на значение большее, чем полоса ПФ $\Delta F_{\text{ПФ}}$, т.е. на значение величины разрешающей способности по дальности:

$$\Delta D_{\text{Н}} = c \cdot \Delta F_{\text{ПФ}} \cdot T_M / 4 f_d , \qquad (4)$$

при этом потенциальная разрешающая способность равна:

$$\Delta D_{\text{П}} = c/(2 f_d) . \qquad (5)$$

Разрешающая способность $\Delta D_{\text{Н}}$ в конечном итоге определяется шириной спектра f_d и шириной полосы пропускания фильтров $\Delta F_{\text{ПФ}}$, которая ограничена конечным значением из-за инерционности фильтров.

Потенциальная разрешающая способность при девиации частоты f_d = 250 МГц и частоте повторения $1/T_M$ = 4 кГц равна $\Delta D_{\text{П}} \approx$ 0,6 м. Реальная разрешающая способность при максимальной дальности 100 м с использованием 4-х перекрывающих фильтров с полосой $\Delta F_{\text{ПФ}}$ = 415 кГц,

при f_d = 400 МГц равна $\Delta D_{\text{Н}} \approx 31$ м.

При оценке разрешающей способности $\Delta D_{\text{ПФ}}$ необходимо также учитывать время установления колебаний в ПФ, которое тем больше, чем уже полоса частот ПФ.

Применение вейвлет-преобразования (ВП). Наиболее перспективным для решения задач РЛТСО является использование ВП, получившего распространение в последнее время. ВП является интегральным преобразованием, что характеризуется малой чувствительностью к случайным изменениям информативных параметров исходного сигнала.

Реализовать ВП можно только с использованием методов цифровой обработки сигналов. При прямой реализации ВП возникают значительные вычислительные трудности, связанные с реализацией интеграла свертки. Эти трудности можно обойти, если использовать свойство интеграла свертки – замену его произведением комплексных амплитудно-частотных спектров исходного сигнала и вейвлет-функции:

$$\Psi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{вх}}(t - t_{\text{з}}) \cdot \psi(\tau - t) dt = \dot{\Phi}_O\{\dot{\Phi}_S(j\omega) \cdot \overset{*}{\Phi}_{\psi}(j\omega)\}, \qquad (6)$$

где $\dot{\Phi}_S\{S(t)\}$ – преобразование Фурье; $\dot{\Phi}_O\{....\}$ – обратное преобразование Фурье.

На рисунке 3 представлена структурная схема РЛТСО с дополнительной обработкой сигнала в виде ВП. При этом, в соответствии с выражением (1), используются 2 блока быстрого преобразования Фурье (БПФ) для формирования частотных спектров излученного и отраженного от нарушителя ЛЧМ-сигналов, блок перемножителя комплексных чисел и блок обратного БПФ (ОБПФ).

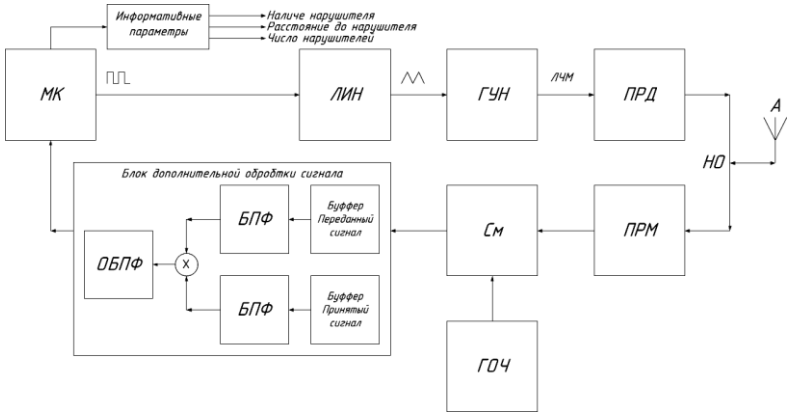


Рисунок 3 – Схема однопозиционной РЛТСО с вейвлет-преобразованием

Синхронный детектор здесь отсутствует, так как биения не формируются. Здесь используется гетеродинирование принимаемого сигнала, то есть смещение частотного спектра вниз по частоте. При этом девиация частоты сохраняется. Для гетеродинирования используется смеситель (СМ) и генератор опорной частоты (ГОЧ) f_{Γ} для реализации смещения частоты в область низких частот, то есть для устранения несущей частоты так, чтобы $f_{\min}$ =0, а $f_{\max} = 2 f_d$.

Блок дополнительной обработкой (БДО) сигнала может быть выполнен либо на сигнальных процессорах, реализующих БПФ, либо на ПЛИС. МК выполняет роль управляющего устройства, которое формирует импульсную последовательность с частотой модуляции $f_{M.}$.Импульсная последовательность в схеме ЛИН преобразуется в линейно-изменяемое напряжение, которое изменяет частоту генерируемых высокочастотных колебаний, формируя ЛЧМ-сигнал. Передающее устройство ПРД представляет собой усилитель мощности, используемый для создания на входе антенны (А) ЛЧМ-сигнала заданного уровня. На рисунке 3 условно показано, что излучаемый сигнал кроме антенны подводится еще и на вход приемного устройства ПРМ. В реальных системах, если используется одна антенна, то необходимо развязывающее устройство в виде направленного ответвителя (НО), который должен гасить сигнал, попадаемый на вход ПРМ с выхода ПРД.

МК формирует измеренные информативные параметры нарушений ОЗ:

– наличие факта нарушения;
– число нарушителей в охраняемой зоне;
– дальность до нарушителей.

Разрешающая способность по дальности для ВП. Эффект сжатия результата ВП по времени дает возможность различения сигналов от нескольких нарушителей в охраняемой зоне (ОЗ). При этом, задавая параметры излучаемого в пространство ОЗ ЛЧМ-сигнала, можно добиться такой разрешающей способности, при которой можно будет принять решение о числе нарушителей в ОЗ. Простое пороговое обнаружение, используемое в РЛТСО с ЛЧМ-сигналом, не позволяет этого сделать.

Частота гармонического колебания нарастает по линейному закону со скоростью

$$\beta = \omega_d / T_S = 2\pi f_d / T_S, \tag{7}$$

где T_S – длительность; ω_d – полное изменение круговой частоты внутри импульса; $\omega_0 = 2\pi f_0$ – центральная частота гармонического колебания. В дальнейшем исходим из условия, что $2\omega_d << \omega_0$. Таким образом,

$$\omega(t) = \omega_0 + \beta t, \quad \text{при} \quad -T_S/2 \le t < T_S/2 \quad , \tag{8}$$

а мгновенное значение сигнала на интервале от $-T_S/2$ до $T_S/2$ определяется выражением

$$S(t) = S_m \cos(\omega_0 t + \beta t^2/2), \tag{9}$$

где фаза гармонического колебания изменяется по квадратичному закону:

$$\varphi(t) = \omega_0 t + \beta t^2/2.$$

Частотный спектр подобного импульса аппроксимируется прямоугольной функцией с граничными частотами $(f_0 - f_d/2) \le f < (f_0 + f_d/2)$, полосой частот $\Delta f_S = 2 f_d$ и максимальным значением [2], равным

$$\Phi_{S,m}(\omega) = S_m \sqrt{\frac{\pi}{2\beta}} = const, \text{ В·с} \tag{10}$$

Для получения результата ВП для ЛЧМ-сигнала используется прямое преобразование свертки. При этом, под интегралом оказывается произведение двух косинусоидальных функций с квадратичным изменением фазы, которое впрямую не преобразовывается к конечному виду.

Воспользуемся свойством свертки, которая может быть выражена через обратное преобразование Фурье от произведения комплексно-сопряженных амплитудно-частотных спектров в виде (6). Кроме того, учтем, что амплитудно-частотный спектр импульса с ЛЧМ может быть аппроксимирован прямоугольной функцией (10) длительностью $2f_d$. Учтем также, что базисная функция ВП:

$$\psi_{\text{ВП}}(t) = S_{\text{вх}}(t).$$

Тогда для ВП получим:

$$\Psi(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{\omega_0 - 2\pi f_d}^{\omega_0 + 2\pi f_d} \dot{\Phi}_S(j\omega) \cdot \dot{\Phi}_\psi(-j\omega) \cdot \exp(j\omega t) \cdot d\omega =$$

$$= \frac{\left|\dot{\Phi}_S(j\omega)\right|^2}{2\pi} \cdot \int_{\omega_0 - \pi f_d}^{\omega_0 + \pi f_d} \exp(j\omega t) \cdot d\omega \cdot \qquad (11)$$

Выполняя преобразование (11) и учитывая (6), получим

$$\Psi(t) = \frac{\Phi_{S,m}^2}{2\pi \cdot (jt)} \cdot \exp(j\omega t) \Big|_{\omega_0 - \pi f_d}^{\omega_0 + \pi f_d} =$$

$$= \frac{\Phi_{S,m}^2}{2\pi \cdot (jt)} \cdot \exp(j\omega_0 t) \cdot [\exp(j\pi f_d t) - \exp(-j\pi f_d t)] \qquad (12)$$

Воспользуемся формулой Эйлера для гармонических функций в комплексной форме и получим:

$$\Psi(t) = \Phi_{S,m}^2 \cdot f_d \cdot \frac{\sin(\pi f_d t)}{\pi t f_d} \cdot e^{-j\omega_0 t}. \qquad (13)$$

В выражении (13) отсутствует в явном виде длительность импульса T_S, которая заключена в $\Phi_{S,m}$, и которая существенным образом влияет на результат ВП. Подставим в (13) выражение (6) и получим результат ВП, выраженный через параметры входного сигнала:

$$\Psi(t) = \frac{S_m^2}{4} \cdot T_S \cdot \frac{\sin(\pi f_d t)}{\pi t f_d} \cdot e^{-j\omega_0 t}, \text{В}^2\text{с}. \qquad (14)$$

Определим длительность ВП по уровню 0,5. Для этого необходимо взять отношение значений функции (14) на уровне 0,5 к максимальному значению. С учетом того, что $\lim_{z \to 0} \frac{\sin z}{z} = 1$, вытекает уравнение

$$\sin(\pi f_d t) = 0,5 \cdot (\pi f_d t), \qquad (15)$$

которое является трансцендентным.

Воспользуемся линейной аппроксимацией функции $\sin z$ на интервале $\frac{\pi}{2} \le z < \pi$. Уравнение прямой определим из общего вида [1]:

$$\frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} = \frac{(y - y_1)}{(y_2 - y_1)}. \qquad (16)$$

Для значений $x_1 = 1/2f_d; y_1 = 1; x_2 = 1/f_d; y_1 = 0;$ соответствующих началу и концу прямой $\gamma_1(t)$ уравнение будет иметь вид

$$\sin(\pi f_d t) \approx -f_d t + 1,5 = \gamma_1(t). \qquad (17)$$

Другое уравнение прямой равно $\gamma_2(t) = 0,5 \cdot (\pi f_d t)$

Трансцендентное уравнение (15) превращается в линейное $\gamma_1(\pi f_d t_1) = \gamma_2(\pi f_d t_1)$, из которого следует $t_1 = \dfrac{1,5}{(1+\frac{\pi}{2}) f_d}$, а длительность ВП по уровню 0,5 будет равна

$$T_{ВП}^{(0,5)} = 2t_1 \approx \frac{1,16}{f_d} \ . \qquad (18)$$

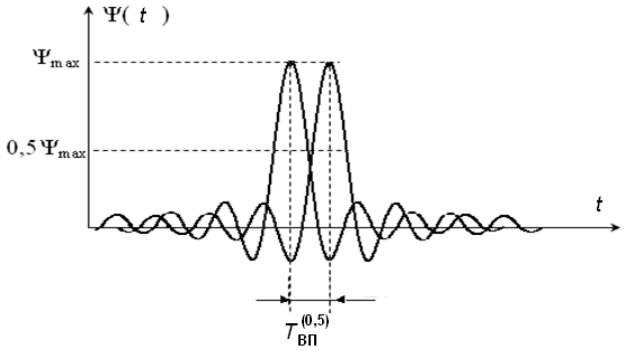


Рисунок 4 – Определение разрешающей способности ВП по времени

Используя выражение (18) для длительности отклика ВП и выражение для дальности, используемое в однопозиционных РЛТСО, получим выражение для разрешающей способности по дальности для случая критерия длительности отклика ВП по уровню 0,5:

$$\delta D = \frac{T_{\text{ВП}}^{(0,5)} \cdot c}{2} = \frac{1,16 \cdot c}{f_d} \ , \qquad (19)$$

где $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения ЭМ-волн в свободном пространстве. Для разрешающей способности по дальности, определяемой размерами человека-нарушителя $\delta D = 0,5$м из (19) получим необходимое значение девиации частоты ЛЧМ-сигнала $f_d = \dfrac{0,38 \cdot c}{\delta D} = 696$МГц. Это потенциальное значение девиации частоты.

Для исследования разрешающей способности по дальности было выполнено моделирование 2-х сигналов на приемной стороне. Для f_d = 150 МГц и частоты повторения ЛЧМ-сигнала $f_М$= 12 кГц. Что по уровню 0,5 из (18) соответствует длительности ВП $T_{ВП}$ = 13,2 нс. Из (19) следует, что разрешающая способность по дальности будет равна

$$\delta D = \frac{T_{\text{ВП}}^{(0,5)} \cdot c}{2} = \frac{1,16 \cdot c}{f_d} = 2,32\text{м} \cdot$$

На рисунке 5 представлен результат ВП для двух ЛЧМ-сигналов, сдвинутых на 5 нс. Видно, что отклики не разделяются.

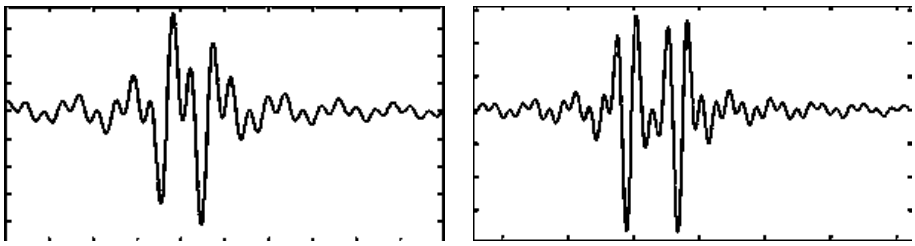


Рисунок 5 – Задержка между двумя сигналами 5 нс и 15 нс

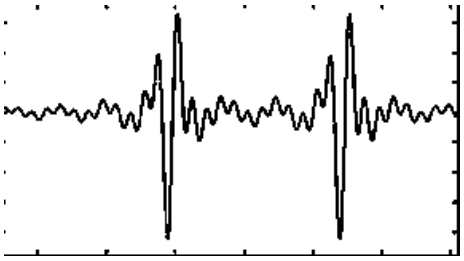


Рисунок 6 – Задержка между двумя сигналами 50 нс

На рисунках 5 и 6 представлены результаты ВП для двух ЛЧМ-сигналов, сдвинутых соответственно на 15 нс и 50 нс. Видно, что отклики уверенно разделяются. Проведенное численное моделирование ВП подтверждает полученных выше математических моделей.

Таким образом, наиболее перспективным для использования в РЛТСО с ЛЧМ-сигналом должен быть метод с вейвлет-преобразованием, который дает значительный эффект по улучшению разрешающей способностью по дальности и отношения сигнал-шум.

Список литературы

1. *Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: Наука, 1966. – 870 с.*
2. *Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Сов.радио, 1971. – 672 с.*
3. *Данилов Е.А., Сальников И.И. Моделирование вейвлет-преобразования в частотных радиолучевых технических системах охраны. – Журнал «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего-плюс» – 2012. – №05(09) – С.107-111.*
4. *Данилов Е.А., Сальников И.И. Оценка параметров вейвлет-преобразования ЛЧМ-сигналов в частотных радиолучевых технических системах охраны. – Журнал «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего-плюс». – 2013. – №10(14) – С.110-117.*

УДК 004.93
ББК 30

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГИПЕРТРЕЙС-МАТРИЦ В КОНТЕКСТЕ АНАЛИЗА ПРОБЛЕМЫ ИНВАРИАНТНОСТИ КОНСТРУИРУЕМЫХ ПРИЗНАКОВ К ПОВОРОТУ 3D ИЗОБРАЖЕНИЯ[1]

© ***Н.Г. Федотов,*** *Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)*
© ***А.А. Сёмов,*** *ООО «КомХэлф» (г. Пенза, Россия)*
© ***Е.А. Крючкова,*** *Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)*

PARTICULARITIES OF FORMING HYPERTRACE MATRICES IN CONTEXT OF ANALYZING THE INVARIANCE PROBLEM OF CONSTRUCTED FEATURES TO ROTATION THE 3D IMAGE

© ***N.G. Fedotov,*** *Penza State University (Penza, Russia)*
© ***A.A. Syemov,*** *LLC «KomHelf» (Penza, Russia)*
© ***E.A. Kruchkova,*** *Penza State University (Penza, Russia)*

В статье рассматривается новый метод анализа и распознавания 3D изображений, кратко описывается его техника сканирования. Вводится удобный инструмент для анализа 3D изображений. Этот инструмент – гипертрейс-матрица, которая является трехмерной трейс моделью исходного объекта. Детально анализируется проблема инвариантности конструируемых признаков к повороту как самого 3D объекта, так и изображения в плоскости сечения. Обосновывается выбор инварианта данного гипертрейс-преобразования к повороту 3D объекта. Этот инвариант – опорная равномерная сетка на сфере. Описываются особенности формирования гипертрейс-матриц, связанные с выбором данного инварианта. Демонстрируются различные теоретические эксперименты по проверке указанных свойств гипетрейс-матриц.

Ключевые слова: анализ и распознавание 3D изображений, гипертрейс-преобразование, гипертрейс-матрица, гипертриплетный признак, инвариантное описание модели, инвариантность к повороту, опорная равномерная сетка на сфере.

In article a new method of 3D images analysis and recognition is considered, its scan technique is briefly described. A convenient tool for 3D image analysis is introduced. This tool is hypertrace matrix which is a three-dimensional trace model of the original object. The invariance problem of constructed features to rotation both the 3D object and the image in the section plane is analyzed in detail. The choice of this trace transform invariant to rotation the 3D object is substantiated. This invariant is a support uniform grid on the sphere. Particularities of forming hypertrace matrices associated with the choice of this invariant are described. Various theoretical experiments to verify these properties of hypertrace matrices are showed.

Key words: 3D image analysis and recognition, hypertrace transform, hypertrace matrix, hypertriplet feature, invariant model description, invariance to rotation, support uniform grid on the sphere.

E-mail: fedotov@pnzgu.ru, mathematik_aleksey@mail.ru, moigus@mail.ru

В последние десятилетия акцент в анализе и распознавания образов смещается с 2D на 3D изображения, т.к. трехмерное моделирование и конструирование позволяют полнее учитывать информацию об объекте, дает возможность видеть его с разных углов обзора и, в частности, позволяет анализировать его пространственную форму [1].

При распознавании образов важной целью является достижение инвариантности распознавания по отношению к группе движений и линейным деформациям объектов, так как от этого зависит надежность распознавания [2]. Полу-

[1] *Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект №12-07-00501).*

чение инвариантного описания объекта требует составления адекватной математической модели, в которой необходимо ввести понятие инварианта и проанализировать его свойства.

Достижение свойства инвариантности признака изображения к повороту является одним из сложных по сравнению с другими операциями (перенос, масштабирование) даже для двумерного случая. В трехмерном пространстве данное обстоятельство осложняется тем, что поворот осуществляется в общем случае сразу в трех измерениях, которые не так однородны, как на плоскости. Об этом говорит тот факт, что равномерную сетку на сфере построить гораздо сложнее, чем на окружности.

1. Математическая модель гипертрейс-преобразования. Сканирование исходного объекта осуществляется сеткой параллельных плоскостей с разных углов обзора. Результат пересечения каждой сканирующей плоскости $B(\eta(\omega,\varphi),r)$ с трехмерной моделью F характеризуется числом: $G = HyperT\left(F \cap B(\eta(\omega,\varphi),r)\right)$, где r, ω, φ – сферические координаты. В результате множество чисел G (какой-либо признак сечения) формирует гипертрейс-матрицу *3TM*, у которой ось 0ω направлена горизонтально, ось 0φ – вертикально, ось $0r$ – вглубь [3].

Таким образом, тройке (ω_i, φ_j, r_k) соответствует элемент матрицы с номером (i, j, k) и значением $HyperT\left(F \cap B(\eta(\omega,\varphi),r)\right)$. Так, например, в общем виде каждая глубинная строка матрицы (ось $0r$) содержит элементы-признаки, вычисляемые по сечениям исходного объекта сеткой параллельных плоскостей, для всех значений расстояний r при фиксированных значениях углов ω и φ.

Данная матрица *3TM* является удобным инструментом для анализа движения распознаваемых объектов и их масштабных изменений. Гипертрейс-матрица – 3D трейс-модель исходного пространственного изображения, который содержит всю информацию о первоначальном объекте, т.к. по данной матрице можно полностью однозначно восстановить исходный трехмерный объект.

Признак 3D изображения получается после обработки строк и столбцов матрицы *3TM* гиперфункционалами *HyperP*, *HyperΩ* и *HyperΘ*. Таким образом, гипертриплетный признак исходного изображения имеет следующую композиционную структуру [4]:

$$\mathrm{Res}(\mathrm{F}) = HyperΘ \circ HyperΩ \circ HyperP \circ HyperT(\mathrm{F}_{\mathrm{sect}}). \qquad (1)$$

Сканирование получаемых в сечение фигур F_{sect} осуществляется сеткой параллельных прямых $l(\rho, \theta)$ с расстоянием $\Delta\rho$ между линиями под разными углами, где ρ и θ – полярные координаты прямой в плоскости сечения F_{sect}. Взаимное положение изображения F_{sect} и каждой сканирующей линии l характеризуется числом: $g = T(F \cap l)$. Результат вычислений трейс функционала T зависит от двух параметров прямой ρ и θ, на основе которых формируется двумерная трейс-матрица *TM*, у которой ось 0θ – горизонтальна, а ось 0ρ – вертикальна. Точке (θ_j, ρ_i) будет соответствовать элемент матрицы с номером (i, j) и значением $T\left(F_{sect} \cap l(\theta_j,\rho_i)\right)$. Обрабатывая строки и столбцы матрицы *TM*, получаем признак 2D сечения [5]:

$$HyperT(F_{sect}) = \Pi(F_{sect}) = \Theta \circ P \circ T\left(F_{sect} \cap l(\theta,\rho)\right). \qquad (2)$$

Гипертрейс-преобразование позволяется давать инвариантное описание исходного 3D объекта путем построения признаков полностью инвариантных

к группе движений и масштабированию, а также извлекать метрические характеристики объекта [6-7].

2. Конструирование признаков, инвариантных к повороту. Стандартный перебор всех углов сетки плоскостей ω и φ в топологическом смысле для непрерывного случая дает модель концентрических сфер с центром в начале координат. Каждой плоскости сопоставим точку ее касания с соответствующей сферой.

Множество точек на единичной сфере образуют сетку, которую будем называть опорной. Отметим, что смена углов происходит согласно узлам опорной сетки, однозначно определяющим единственную плоскость.

При повороте объекта секущие плоскости (например, сечение, проходящее через центр масс объекта и перпендикулярное главной оси объекта) будут соответствовать другим точкам опорной сетки, чем у объекта до поворота. В связи с этим, распределение точек на сферы должно быть равномерным, т.к. любое отклонение узлов сетки друг от друга при повороте сферы на любой угол влияет на изменение угла наклона секущих плоскостей и, как следствие, на вычисляемые гипертриплетные признаки. Способы построения данного инварианта (равномерная сетка на сфере) описаны в [8].

Инвариантность к повороту получаемых признаков зависит не только от плотности совокупности сеток сканирующих плоскостей в пространстве, но и применения специального типа функционалов.

В функциональном виде свойство инвариантности к сдвигу периодической функции f с периодом r для любого функционала ζ будет иметь вид: $\zeta(f(x+b)) = \zeta(f(x+rk))$ для всех допустимых $f(x)$ и $\forall b$, где $r,k \in R$, $r > 0$.

Указанное выше свойство имеет свои особенности в зависимости от того, какая матрица рассматривается (*3TM* или *TM*) и о какой размерности идет речь (пространство или плоскость). Так, для 2D изображения сечения свойство инвариантности к повороту сечения вокруг вектора нормали его плоскости для любого функционала ζ выглядит следующим образом: $\zeta(f(\theta+b)) = \zeta(f(\theta))$ для всех допустимых $f(x)$ и $\forall \theta$.

В терминах трейс-матриц данное свойство можно интерпретировать как сдвиг в строках матрицы *TM* на θ-ое число вперед или назад соответственно, в зависимости от знака угла. При этом порядок их следования друг за другом не изменится (на сдвиг в столбцах влияет перенос 2D изображения). Соответственно ее трейс-образ (графическое представление матрицы *TM*) будет сдвинут вдоль оси 0θ на соответствующее расстояние, равное углу поворота.

Для 3D изображения и формирования гипертрейс-матрицы рассматриваемое свойство имеет существенные ограничения и свои особенности. Так как равномерная сетка на сфере неизоморфна равномерной сетке на плоскости, то при формировании матрицы *3TM* возникают трудности сохранения целостности структуры самой гипертрейс-матрицы.

Более подробно свойства инвариантности для гипертрейс-преобразования можно найти в [9], для трейс-преобразования в плоскости сечения – в [10].

3. Проблема сохранения целостности гипертрейс-матрицы. Так как порядок сечений (дискретная форма 3D объекта) не изменяется при повороте сетки сканирующих плоскостей, то глубинные строки сохраняют свой порядок

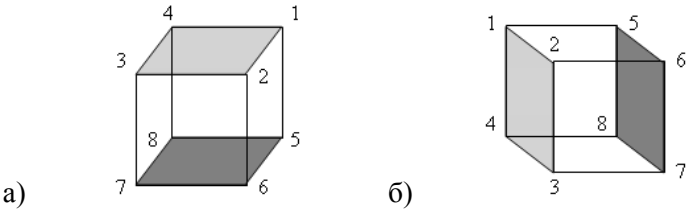
следования элементов (игнорируя дискретный шаг сканирования). Однако, порядок следования элементов в горизонтальной строке (ось 0ω) или вертикальном столбце (ось 0φ) матрицы *3TM* в общем случае не сохраняется. Произвольный поворот 3D объекта может произвести не только вертикальные и горизонтальные сдвиги, но также различные диагональные и угловые сдвиги элементов матрицы, в частности, параллельно ее главным диагоналям.

Разберем более детально проблему сохранения целостности гипертрейс-матрицы на конкретном примере, сделав необходимые пояснения. Начиная с этого момента, здесь и далее будут показаны теоретические примеры гипертрейс-матриц, которые аналогичны реальным практическим результатам. Ввиду громоздкости представления реальных гипертрейс-матриц, которая является трехмерной, то для пояснения идеи достаточно будет представить небольшую двумерную матрицу. Она получается из матрицы *3TM* после обработки ее глубинных строк функционалом *HyperP* (сворачивание по оси $0r$). В качестве функционалов *HyperΩ* и *HyperΘ*, обрабатывающих вертикальные и горизонтальные строки, будут взяты соответственно *mean* и *min*: среднее арифметическое и минимум.

Кроме того, в качестве признаков-элементов матрицы *2TM* брались числа, которые совпадают с самим номером узла опорной сетки (для наглядности соответствий). В общем случае элементами матрицы могут быть произвольные числа.

В качестве примера был взята опорная сетка из 8 узлов с равномерным распределением на сфере – вершины куба (геометрическое объяснение). Ввиду загромождения рисунка сама сфера не рисовалась. В целях иллюстративности некоторые грани были окрашены в разные тона. Также, согласно принципу относительности, поворот объекта вокруг неподвижной сетки равнозначен повороту сетки в противоположном направлении вокруг неподвижного объекта. Поэтому для лучшей визуальной демонстрации явления поворачивалась опорной сетка в виде куба (рисунок 1).

Правило заполнения матрицы такое: сверху вниз справа налево по часовой стрелке, начиная с точки в первом октанте координатной системы. Начало координат находится в центре куба.



а) $\begin{pmatrix}1&2&3&4\\5&6&7&8\end{pmatrix}\xrightarrow{mean}\begin{pmatrix}2.5\\6.5\end{pmatrix}\Downarrow|\min$ $Res=2.5$

б) $\begin{pmatrix}5&6&2&1\\8&7&3&4\end{pmatrix}\xrightarrow{mean}\begin{pmatrix}3.5\\5.5\end{pmatrix}\Downarrow|\min$ $Res=3.5$

Рисунок 1 – Исходный (а), повернутый (б) куб и составленная по ним гипертрейс-матрица, результирующий признак Res

Как видно из расчетов, представленных на рисунке 1, даже поворот на 90^0 вокруг одной из декартовых осей (ось абсцисс) не сохраняет неизменным значение гипертриплетного признака. В общем случае, когда узлов будет значительно больше и поворотов будет несколько, инвариантность к повороту также соблюдена не будет.

К данной проблеме можно подойти и с другой стороны. Так, любое вращение в трехмерном пространстве может быть представлено как композиция поворотов вокруг трех ортогональных осей (например, вокруг осей декартовых координат). Этой композиции соответствует матрица, равная произведению соответствующих трех матриц поворота:

$$\mathbf{M}_x(\alpha)=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha\\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha\end{pmatrix},\ \mathbf{M}_y(\beta)=\begin{pmatrix}\cos\alpha & 0 & \sin\alpha\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha\end{pmatrix},\ \mathbf{M}_z(\lambda)=\begin{pmatrix}\cos\alpha & \sin\alpha & 0\\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}. \quad (3)$$

Т.к. матрицы поворота не обладают свойством коммутативности, то перемена матриц местами изменит положение объекта с одного на другое. В общем случае, ориентация пространственного объекта, получаемая в результате двух последовательных конечных поворотов, зависит от порядка выполнения этих поворотов, например:

$$F\cdot\mathbf{M}_x(\alpha)\cdot\mathbf{M}_y(\beta)\neq F\cdot\mathbf{M}_y(\beta)\cdot\mathbf{M}_x(\alpha). \quad (4)$$

Таким образом, основная проблема состоит в сохранении порядка следования строк и столбцов друг за другом. Эта проблема легко решается, если определить не только правила формирования гипертрейс-матриц, но и ключевые точки. Данные опорные ключевые точки определяют начало отсчета (например, первая строка), от которого начинается заполняться гипертрейс-матрица. Например, по часовой стрелке в направлении отсчета от первой ключевой точки, а не с первого октанта пространства декартовых осей, как на рисунке 1.

В качестве ключевой точки, например, можно взять узел на опорной сетке, который соответствует сетке секущих плоскостей, содержащей максимальное по площади сечение исходного 3D объекта. Таким образом, ключевые точки могут не только определяться в той же технике сканирования (обработка строк и столбцов матрицы *3TM*), но при этом и сами могут выступать как гипертриплетные признаки 3D объекта.

4. Особенности формирования гипертрейс-матриц. Порядок следования горизонтальных строк (ось 0ω) и вертикальных столбцов (ось 0φ) имеет свои нюансы, которые мы разберем ниже.

Так как отдельная реализация гипертрейс-матрицы с отсутствием свойств инвариантности к повороту и ее экспериментальная проверка свойств нецелесообразна на практике, то в данной статье здесь и далее будет приведен теоретический пример данного явления. Те примеры гипертрейс-матриц, которые обладают данным свойством инвариантности, будут сформированы по аналогии с практически реализованными матрицами *3TM*.

Ниже представлены результаты таких теоретических экспериментов.

$$\text{а)}\begin{pmatrix}1 & 2 & 3\\ 4 & 5 & 6\\ 7 & 8 & 9\\ 10 & 11 & 12\end{pmatrix}\xrightarrow{mean\ \Rightarrow}\begin{pmatrix}2\\ 5\\ 8\\ 11\end{pmatrix}\Downarrow;\quad \min=2 \qquad \text{б)}\begin{pmatrix}3 & 1 & 2\\ 6 & 4 & 5\\ 9 & 7 & 8\\ 12 & 10 & 11\end{pmatrix}\xrightarrow{mean\ \Rightarrow}\begin{pmatrix}2\\ 5\\ 8\\ 11\end{pmatrix}\Downarrow;\quad min=2$$

$$\text{в)}\begin{pmatrix}12 & 10 & 11\\ 3 & 1 & 2\\ 6 & 4 & 5\\ 9 & 7 & 8\end{pmatrix}\xrightarrow{mean\ \Rightarrow}\begin{pmatrix}11\\ 2\\ 5\\ 8\end{pmatrix}\Downarrow;\quad min=2 \qquad \text{г)}\begin{pmatrix}9 & 7 & 8\\ 12 & 10 & 11\\ 3 & 1 & 2\\ 6 & 4 & 5\end{pmatrix}\xrightarrow{mean\ \Rightarrow}\begin{pmatrix}8\\ 11\\ 2\\ 5\end{pmatrix}\Downarrow.\quad min=2 \quad (5)$$

Рисунок 2 – Равномерные сдвиги: а) Исходная матрица 2TM; б) Равномерный сдвиг по строкам матрицы пункта (а); в) Равномерный сдвиг в столбцах матрицы пункта (б) после ее равномерного сдвига в строках; г) Равномерный сдвиг в столбцах, а потом в строках матрицы пункта (а).

Как видно из расчетов первого эксперимента (рисунок 2), когда все столбцы и строки одинаково сдвигаются на фиксированную величину конечный признак *Res(F)* сохраняет свое значение равное 2. Кроме того, гипертриплетный признак сохраняет свою величину, даже если поменять порядок обработки функционалами *Hyper*Ω и *Hyper*Θ местами (рисунок 2г). Данное обстоятельство указывает на тот факт, что равномерный сдвиг в столбцах не оказывает влияние на нарушение свойства инвариантности к повороту.

При введении неравномерного сдвига в строках и/или столбцах исходной матрицы *2TM* ситуация меняется.

Как видно из расчетов рисунка 3б и 3в, при неравномерном перемещении в строках далее сдвиг в столбцах может быть только равномерным (ось 0φ). В тоже время сдвиг по строкам может быть любой (ось 0ω). Если сначала произвести различный сдвиг столбцов матрицы *2TM*, то даже при отсутствии сдвига в строках инвариантность к повороту будет нарушена (рис. 3г).

$$\text{а)}\begin{pmatrix}3&1&2\\4&5&6\\8&9&7\\11&12&10\end{pmatrix}\xrightarrow{mean}\begin{pmatrix}2\\5\\8\\11\end{pmatrix};\quad \min=2 \qquad \text{б)}\begin{pmatrix}4&5&6\\8&9&7\\11&12&10\\3&1&2\end{pmatrix}\xrightarrow{mean}\begin{pmatrix}5\\8\\11\\2\end{pmatrix};\quad \min=2$$

$$\text{в)}\begin{pmatrix}4&1&10\\8&5&2\\11&9&6\\3&12&7\end{pmatrix}\xrightarrow{mean}\begin{pmatrix}3\\5\\26/3\\22/3\end{pmatrix};\quad \min=3 \qquad \text{г)}\begin{pmatrix}7&2&12\\10&5&3\\1&8&6\\4&11&9\end{pmatrix}\xrightarrow{mean}\begin{pmatrix}7\\6\\5\\8\end{pmatrix}.\quad \min=5 \qquad (6)$$

Рисунок 3 – Неравномерные сдвиги: а) Различный сдвиг в строках исходной матрицы 2TM; б) Равномерный сдвиг в столбцах матрицы пункта (а); в) Различный сдвиг в столбцах матрицы пункта (а); г) Различный сдвиг в столбцах исходной матрицы 2TM.

Таким образом, сдвиг по столбцам в гипертрейс-матрице должен быть произведён на одну и ту же величину (ось 0φ), тогда как сдвиг по строкам может быть произведён одновременно на разные величины (ось 0ω). Указанное свойство находит своё отражение в правилах построения матриц *3TM.*

Также проведенные эксперименты показывают, что порядок следования функционалов играет важную роль, позволяя увеличивать количество инвариантных признаков. Так, обработка строк матрицы *3TM* сначала функционалом *Hyper*Ω=*max*, а потом функционалом *Hyper*Θ=*min* и наоборот (*Hyper*Ω=*min* и *Hyper*Θ=*max*) в общем случае даст разные признаки *Res(F).*

Возвращаясь к проблеме построения инвариантных к повороту признаков 3D объектов (раздел 2), по результатам приведенных выше экспериментов можно сделать следующий вывод. Для совокупности сечений 3D изображения свойство инвариантности к повороту 3D объекта вокруг произвольного единичного вектора для любого функционала ζ будет иметь вид: $\zeta\left(f\left(\omega+\nu_i,\varphi+b\right)\right)=\zeta\left(f\left(\omega,\varphi\right)\right)$ для всех допустимых $f(x)$, $\forall b$ и $\forall \nu$, где b – случайное число (равномерный сдвиг отдельно в столбцах матрицы *3TM* без

изменения глубинных строк), v – вектор сдвига одновременно на разные величины в горизонтальных строках матрицы *3TM* при сохранении целостности глубинных строк.

Для 3D случая, в терминах трейс-матриц строки и столбцы матрицы *3TM* сдвинутся на ω-ое и φ-ое число вперед или назад соответственно, в зависимости от знака углов. При этом порядок их следования друг за другом не изменится. Соответственно ее гипертрейс образ (графическое представление гипертрейс-матрицы) будет сдвинут вдоль горизонтальной 0ω и вертикальной оси 0φ на соответствующее расстояние, равное углам поворота.

Ввиду громоздкости представления реальных гипертрейс-матриц и теоретического характера статьи, а также ограниченности объема настоящей работы, реальные практические эксперименты по формированию и тестированию свойств матриц *3TM* в данной статье не проводится. Различные примеры построения гипертрейс-матриц можно найти в [3].

Возможность получения инвариантного описание 3D изображения заметно повышает надежность распознавания, хотя и является сложным с математической точки зрения.

Техника сканирования гипертрейс-преобразования состоит в сканировании 3D объекта сеткой параллельных плоскостей с разных углов обзора. По результатам пересечения формируется гипертрейс-матрица, которая является удобным инструментом для анализа движения распознаваемых объектов и их масштабных изменений.

Инвариантом к повороту 3D объекта в данном методе служит равномерная опорная сетка на сфере, которая совмещается сама с собой при любом повороте исходного объекта (дискретный шаг сетки игнорируется, т.к. возможно построение со сколь угодно плотным распределением точек на сфере). Обычной сетка карты глобуса не подходит, т.к. она задает неравномерную плотность плоскостей в пространстве: у полюса более плотное скопление точек, чем у экватора.

Наилучший способ построения гипертрейс-матрицы тот, который будет наиболее близким к конструированию опорной сетки на сфере, когда построение узлов и формирование строк матрицы осуществляться в одной технике.

Инвариантность к повороту получаемых признаков зависит также от применения специального типа функционалов (свойство инвариантности к сдвигу периодической функции). Для трехмерного случая формирование гипертрейс-матрицы имеет особенности и ограничения.

Проблема сохранения целостности гипертрейс-матрицы возникает из-за того, что равномерная сетка на сфере неизоморфна равномерной сетке на плоскости (или, что эквивалентно, некоммутативности свойства умножения матриц поворотов вокруг осей координат). Это, в свою очередь, влияет на порядок следования строк и столбцов друг за другом в матрице *3TM*. Данная проблема легко решается, если определять не только правила формирования гипертрейс-матриц, но и ключевые точки. Эти опорные ключевые точки определяются в той же технике сканирования и сами могут считаться как признаки ***Res(F)***.

Приведенные в статье теоретические эксперименты доказывают, что необходимо соблюдать определенные правила формирования гипертрейс-матрицы. Распределение по переменной φ (сдвиг по вертикальным столбцам матрицы *3TM*) должно быть только равномерным. В показанных ранее примерах можно заметить, что с каждым шагом размерность матрицы убывает на одну. Это свойство полезно с практической точки зрения, так как избавляет от

необходимости обрабатывать и постоянно ссылаться на трехмерную матрицу, что дополнительно ускоряет время работы алгоритма.

Авторы планирует развить данный метод для анализа дефектов и особенностей на поверхности трехмерных объектов, для анализа особенностей 3D моделей и их метрических характеристик, для сегментации и нелинейной обработки 3D изображений, аналогично уже разработанной теории для 2D изображений [11, 12]. Гипертрейс-преобразование способно распознавать не только контурные, но текстурные и цветные 3D изображения, аналогично плоскому трейс-преобразованию [13, 14].

Список литературы

1. *Song, S. Sliding shapes for 3D object detection in depth images [Text] / S. Song, J. Xiao / Proceedings of the 13th European Conference on Computer Vision (ECCV 2014). – Zurich, Switzerland : Springer, 2014. – Part VI. – Vol. 8694. – P. 634-651.*
2. *Kiy, K.I. Segmentation and detection of contrast objects and their application in robot navigation [Text] / K.I. Kiy // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. – 2015. – Vol. 25. – No. 2. – P. 338-346.*
3. *Сёмов, А. А. Основные методы построения гипертрейс-матриц [Текст] / А. А. Сёмов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс : научно-методический журнал. – 2015. – № 03 (25). – Т. 1. – С. 69–76. – (Технические науки. Информационные технологии).*
4. *Сёмов, А.А. Аналитическая структура признаков 3D-изображений: анализ, свойства, примеры [Текст] / А.А. Сёмов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс: научно-методический журнал. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. ун-та, 2016. – №03(31). – С. 63-70. □ (Технические науки. Информатика, вычислительная техника и управление).*
5. *Fedotov, N.G. The theory of image-recognition features based on stochastic geometry [Text] / N.G. Fedotov // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. – 1998. – Vol. 8. – No. 2. – Moscow: Pleiades Publishing, Ltd. – P. 264-266.*
6. *Fedotov, N.G. Trace transform of three-dimensional objects: recognition, analysis and database search [Text] / N.G. Fedotov, S.V. Ryndina, A.A. Semov // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. – 2014. – Vol. 24. – No. 4. – Moscow: Pleiades Publishing, Ltd. – P. 566-574.*
7. *Федотов, Н.Г. Минимизация признакового пространства распознавания 3D изображения на основе стохастической геометрии и функционального анализа [Текст] / Н.Г. Федотов, А.А. Семов, А.В. Моисеев // Машинное обучение и анализ данных. – 2015. – Т. 1. – №13. – Электронный журнал. – Издательство: Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН (Москва). – С. 1796-1814.*
8. *Сёмов, А.А. Построение оптимальной стохастической равномерной сетки на сфере, инвариантной к повороту 3D изображения в пространстве [Текст] / А.А. Сёмов // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: сб. статей XV международной научно-технической конференции. – Пенза: Приволжский дом знаний. – 2015. – С. 134-141.*
9. *Федотов, Н.Г. Интеллектуальные возможности гипертрейс-преобразования: конструирование признаков с заданными свойствами [Текст] /*

Н.Г. Федотов, А.А. Сёмов, А.В. Моисеев // Машинное обучение и анализ данных. – 2014. – Т. 1. – №9. – Электронный журнал. – Издательство: Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН (Москва). – С. 1200 - 1214.

10. Федотов, Н.Г. Теория признаков распознавания образов на основе стохастической геометрии и функционального анализа [Текст] / Н.Г. Федотов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 304 С.

11. Федотов, Н.Г. Нелинейная фильтрация изображений на основе трейс-преобразования [Текст] / Н.Г. Федотов, А.А. Сёмов, Е.А. Крючкова // Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов: сборник статей X Всероссийской научно-технической конференции. – Пенза: Изд-во АННОО «Приволжский дом знаний», 2012. – с. 14-19

12. Fedotov, N. Application of triple features theory to the analysis of half-tone images and colored textures. Feature construction along stochastic geometry and functional analysis. Computer and Information Science / N. Fedotov, S. Romanov, D. Goldueva // Canadian Center of Science and Education Canada, 2013. V. 6. №4. P. 17-24.

13. Fedotov, N.G. Recognition of images with complex half-tone texture / N.G. Fedotov, D.A. Mokshanina // Measurement Techniques. – 2011. – Vol. 53. – № 11. – P. 1226-1232.

14. Fedotov, N.G. Recognition of halftone textures from the standpoint of stochastic geometry and functional analysis / N.G. Fedotov, D.A. Mokshanina // Pattern Recognition and Image Analysis, Advances in Mathematical Theory and Applications. – 2010. – Vol. 20. – No. 4. – Moscow: Pleiades Publishing, Ltd. – P. 551-556.

УДК 004.942
ББК 32

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА СВЧ-УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

© ***С.Е. Савотченко,*** *Белгородский государственный институт искусств и культуры (г. Белгород, Россия)*
© ***И.Н. Перепелкин,*** *Белгородский государственный институт искусств и культуры (г. Белгород, Россия)*
© ***Р.А. Дунаев,*** *Белгородский государственный институт искусств и культуры (г. Белгород, Россия)*

DEVELOPMENT OF THE ANALYSIS METHOD OF SHF-DEVICES USING WAVELET DECOMPOSITION

© ***S.E. Savotchenko,*** *Belgorod State Institute of Art and Culture (Belgorod, Russia)*
© ***I.N. Perepelkin,*** *Belgorod State Institute of Art and Culture (Belgorod, Russia)*
© ***R.A. Dunaev,*** *Belgorod State Institute of Art and Culture (Belgorod, Russia)*

В статье рассматривается вопрос разработки метода анализа СВЧ-устройств с использованием вейвлет-преобразования в виде кратномасштабного анализа. Показано, что использование

вейвлетов позволяет уменьшить вычислительную нагрузку при анализе сложных устройств имеющих различную структуру.

Ключевые слова: вейвлет-анализ, масштабирующая функция, матрица разложения, матрица восстановления.

The article examines the issue of analysis method development of SHF-devices through the use of multiple-scale analysis. It is achieved that using of wavelet allows to reduce processing load at analysis of complex devices with different structure.

Key words: wavelet analysis, scaling function, decomposition matrix, regeneration matrix.

E-mail: savotchenkose@mail.ru; igorperepelkin@yandex.ru; r_dunaev@bk.ru

Современный уровень развития технологий позволяет снижать размеры схем при помощи комбинации достаточно большого числа СВЧ компонентов, располагая их плотнее. В таких устройствах применяется геометрия с возможностью изменения размеров в широком диапазоне, малый размер ее функциональной части и подвижных частей. Следствием этого является проблема прогнозирования их характеристик. Для решения задачи макетирования сложных устройств необходимо использовать сверхминиатюрные элементы и большое количество отладочных средств. В связи с этим, вначале целесообразно провести численное моделирование, в основе которого лежат надежные и легко программируемые волновые временные методы. Они дают возможность имитации воздействия в требуемой полосе частот и позволяют с высокой точностью определять характеристики простейших элементов. Это позволяет в последующем расширить их на большие схемы.

Кратномасштабный временной метод представляет собой развитие обычных волновых временных методов и основывается на принципах кратномасштабного анализа. Он позволяет использовать вейвлеты с целью уменьшения вычислительной нагрузки при анализе сложных устройств имеющих различную структуру. Вейвлет-анализ позволяет реализовать высокий уровень пространственной детализации с высоким частотным содержанием, а для частей устройства с быстро меняющимися параметрами – адаптивно изменять разрешение [1].

Уравнения

$$\frac{dE_x}{dt} = \frac{1}{\varepsilon}\frac{dH_z}{dy} \tag{1}$$

$$\frac{dE_y}{dt} = \frac{1}{\varepsilon}\frac{dH_z}{dx} \tag{2}$$

$$\frac{dH_z}{dt} = \frac{1}{\mu}\left[\frac{dE_x}{dy} - \frac{dE_y}{dx}\right] \tag{3}$$

это уравнения Максвелла, которые описывают двумерное электромагнитное поле в среде не имеющей источников и затуханий. Для разложения поля E_x в (1) по составляющим масштабирующей функции и вейвлетов Хаара [2,3]. Воспользуемся следующим выражением:

$$E_x(x,y)=\sum_{n,i,j} h_n(t)\Big[{}_nE^{x,\phi\phi}_{i,j}\phi_i(x)\phi_j(y)+\sum_{r=0}^{r_{\max}}\sum_{p=0}^{2^r-1}{}_nE^{x,\psi\phi}_{i,j,r,p}\psi^r_{i,p}(x)\phi_j(y)+ \\ +\sum_{r=0}^{r_{\max}}\sum_{p=0}^{2^r-1}{}_nE^{x,\phi\psi}_{i,j,r,p}\phi_i(x)\psi^r_{j,p}(y)+\sum_{r=0}^{r_{\max}}\sum_{p=0}^{2^r-1}\sum_{s=0}^{r_{\max}}\sum_{q=0}^{2^r-1}{}_nE^{x,\psi\psi}_{i,j,r,p}\psi^r_{i,p}(x)\psi^s_{j,q}(y)\Big], \tag{4}$$

где ${}_n\mathrm{E}^{x,\varphi\varphi}_{i,j}$ – коэффициент, который соответствует масштабирующим функциям по x и y. Он представляет собой значение электрического поля в (i, j)-области с временным шагом n; $\psi^r_{i,p}$ – вейвлет с уровнем разрешения r принадлежащей области i, ϕ – масштабирующая функция. Оставшиеся коэффициенты аналогичны. Зависимость от времени на каждом шаге прохождения импульса $h_n(t)$ постоянна [4].

Двумерное разложение на коэффициенты вейвлетов и масштабирующих функций проводится по x и y. Коэффициенты в (4) представляют собой произведение базисных функций в двух направлениях. Каждое из произведений дает один коэффициент разложения. В конечном итоге образуются 4 группы коэффициентов – масштабирующая функция – x, масштабирующая функция – y, вейвлет – x масштабирующая функция – y, масштабирующая функция – x вейвлет – y и вейвлет – x вейвлет – y. Это дает $2^{2(r_{\max}+1)}$ вейвлетов в случае уровня разрешения r_{max}. Для данного уровня разрешения каждое из произведений порождает четыре коэффициента, представленные на рисунке 1.

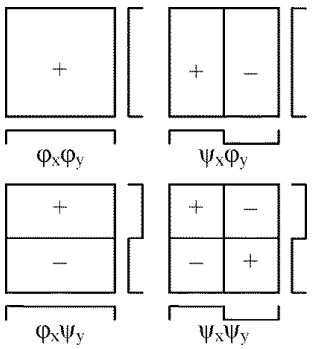


Рисунок 1 – Двумерные коэффициенты Хаара для $r_{max}=0.$

После разложения полей E и H по коэффициентам вейвлетов, эти значения нужно подставить в уравнения (1)–(3). Далее эти уравнения решаются при помощи метода моментов для каждого из коэффициентов. В двумерном случае величина каждого коэффициента соответствует значениям в центральных точках областей. Их размеры определяются соответствующим вейвлетом с максимальным разрешением (рисунок 1). Уравнения (1)–(3) принимают следующий вид:

$${}_n\mathbf{E}^x_{i,j}={}_{n-1}\mathbf{E}^x_{i,j}+\frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta y}\left(\mathbf{U}_{E_{x1}n-1}\mathbf{H}^z_{i,j}+\mathbf{U}_{E_{x2}n-1}\mathbf{H}^z_{i,j-1}\right) \tag{5}$$

$${}_n\mathbf{E}^y_{i,j}={}_{n-1}\mathbf{E}^y_{i,j}+\frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta y}\left(\mathbf{U}_{E_{y1}n-1}\mathbf{H}^z_{i,j}+\mathbf{U}_{E_{y2}n-1}\mathbf{H}^z_{i-1,j}\right) \tag{6}$$

$$\mathbf{H}^{y}_{i,j} =_{n\text{-}1} \mathbf{H}^{y}_{i,j} + \frac{\Delta t}{\mu}\left[\frac{1}{\Delta y}\left(\mathbf{U}_{H_{Ex1}\,n-1}\mathbf{E}^{x}_{i,j} + \mathbf{U}_{H_{Ex2}\,n-1}\mathbf{E}^{x}_{i,j+1}\right) - \right. \tag{7}$$

$$\left. - \frac{1}{\Delta x}\left(\mathbf{U}_{H_{Ey1}\,n-1}\mathbf{E}^{y}_{i,j} + \mathbf{U}_{H_{Ey2}\,n-1}\mathbf{E}^{y}_{i+1,j}\right)\right].$$

Уравнения (5)-(7) представлены в матричной форме, где ${}_{n}\mathbf{E}^{x}_{i,j}$ – вектор, определяющий коэффициенты вейвлетов и масштабирующих функций, определяющих электрическое поле в области (i, j). Матрицы **U** представляют собой результат скалярного произведения, полученного с помощью метода моментов. Полученные результаты дают возможность менять разрешение по областям и этими изменениями могут быть функции от времени. Временной шаг для представленного метода определяется следующим выражением:

$$\Delta t = \frac{1}{c\sqrt{\left(\frac{2^{r_{max}+1}}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{2^{r_{max}+1}}{\Delta y}\right)^2}} \tag{8}$$

Данный метод позволяет получать сетку меняющуюся по времени и областям, которая применяется для моделирования уравнений Максвелла. Ранее не указывалось, что можно также варьировать и диэлектрической проницаемостью, что позволяет эффективно моделировать структуры, состоящие из диэлектриков. Однако анализ смешанных структур, подобных печатным платам, представляет определенные трудности.

Граничным условием для печатных проводников является то, что электрические поля, тангенциальные проводникам, должны равняться нулю. В уравнениях (5)–(7) для вычисления коэффициентов на следующих временных шагах необходимо учитывать коэффициенты соседних областей, которые получены ранее. В случае, когда размер области печатного проводника равен или превышает область прохода кратномасштабного временного метода анализа, все коэффициенты должны обнулиться в соответствии с краевым условием.

Напротив, в случае, когда область печатного проводника меньше анализируемого размера области, коэффициенты необходимо модифицировать. В данном случае необходимо обнулить значения только области проводника, а оставшиеся коэффициенты не меняются.

Для определения коэффициентов, которые необходимо обнулить, используем матрицу восстановления. Например, матрицы ${}_{n}\mathbf{E}^{x}_{i,j}$ в уравнениях (5)–(7) преобразуются в значения электрического поля умножением на матрицу, которая является суммой полей в выбранных точках сетки. В этом случае

$$\mathbf{E_R} = \mathbf{R}\mathbf{E_W}, \tag{9}$$

где $\mathbf{E_R}$ – восстанавливаемые поля; $\mathbf{E_W}$ – коэффициенты вейвлетов; **R** – матрица восстановления. Обратим внимание, что число коэффициентов в $\mathbf{E_W}$ равно числу восстанавливаемых точек в $\mathbf{E_R}$. Таким образом, **R** – квадратная матрица. Для случая $r_{max} = 0$ выражение (9) будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{1,1} \\ \mathbf{E}_{1,2} \\ \mathbf{E}_{2,1} \\ \mathbf{E}_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}_{\mathrm{n}}\mathbf{E}_{\mathrm{i,j}}^{\mathrm{x},\varphi\varphi} \\ {}_{\mathrm{n}}\mathbf{E}_{\mathrm{i,j}}^{\mathrm{x},\psi\varphi} \\ {}_{\mathrm{n}}\mathbf{E}_{\mathrm{i,j}}^{\mathrm{x},\varphi\psi} \\ {}_{\mathrm{n}}\mathbf{E}_{\mathrm{i,j}}^{\mathrm{x},\psi\psi} \end{bmatrix}. \tag{10}$$

в случае соответствия координат восстанавливаемых полей (рисунок 2).

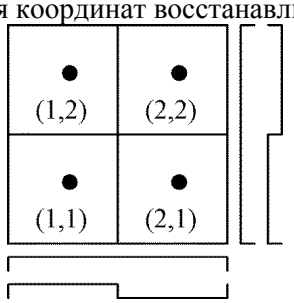


Рисунок 2 – Координаты восстанавливаемых полей

При помощи матрицы **R** можно восстановить значения поля из коэффициентов вейвлетов и масштабирующих функций. Также можно воспользоваться $\mathbf{R}^{-1}$ для разложения значений электрического поля обратно в коэффициенты. Таким образом, применение краевого условия для печатных проводников может быть реализовано в конкретных точках сетки восстановлением значений поля, обнуления полей в точках нахождения проводников с последующим разложением обратно в коэффициенты вейвлетов.

Тем не менее, более эффективные результаты дает метод, когда матрицы восстановления/разложения используются непосредственно в уравнениях (5)–(7). Например, умножение (5) на **R**, используя соотношение $\mathbf{H}_{\mathrm{i,j}}^{\mathrm{z}} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{R}\mathbf{H}_{\mathrm{i,j}}^{\mathrm{z}}$ и обозначив $\mathbf{U}' = \mathbf{R}\mathbf{U}\mathbf{R}^{-1}$, получим:

$$\mathbf{R}_n\mathbf{E}_{i,j}^{x} = \mathbf{R}_{n\text{-}1}\mathbf{E}_{i,j}^{x} + \frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta y}\left(\mathbf{U}'_{E_{x1}}\mathbf{R}_{n\text{-}1}\mathbf{H}_{i,j}^{z} + \mathbf{U}'_{E_{x2}}\mathbf{R}_{n\text{-}1}\mathbf{H}_{i,j\text{-}1}^{z}\right) \tag{11}$$

Это позволяет обновлять точки электрического поля в соответствии с точками магнитного поля.

При помощи выражения (11) можно обнулить точки поля, которое тангенциально печатному проводнику. Для этого умножим на матрицу $\mathbf{I}_\mathbf{p}$, которая является единичной матрицей с нулями в строках, соответствующих расположению проводников. Выражение (11) является уравнением обновления. При условии нулевых начальных значений электрического и магнитного полей нет необходимости в умножении векторов электрического поля на $\mathbf{I}_\mathbf{p}$.

Уравнение обновления в случае обнуления в местах расположения печатных проводников принимает вид:

$$\mathbf{R}_n\mathbf{E}_{i,j}^{x} = \mathbf{R}_{n\text{-}1}\mathbf{E}_{i,j}^{x} + \frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta y}\left(\mathbf{I}_p\mathbf{U}'_{E_{x1}}\mathbf{R}_{n\text{-}1}\mathbf{H}_{i,j}^{z} + \mathbf{I}_p\mathbf{U}'_{E_{x2}}\mathbf{R}_{n\text{-}1}\mathbf{H}_{i,j\text{-}1}^{z}\right) \tag{12}$$

При умножении (12) на $\mathbf{R}^{-1}$ и введя обозначение $\mathbf{U}^{\mathrm{p}} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{I}_\mathbf{p}\mathbf{U}'\mathbf{R}$, получаем уравнение обновления для печатных плат с использованием кратномасштабного временного метода анализа:

$$ {}_{n}\mathbf{E}^{x}_{i,j} = {}_{n-1}\mathbf{E}^{x}_{i,j} + \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta y}\left(\mathbf{U}^{p}_{E_{x1}\,n-1}\mathbf{H}^{z}_{i,j} + \mathbf{U}^{p}_{E_{x2}\,n-1}\mathbf{H}^{z}_{i,j-1}\right) \quad (13) $$

Уравнение (13) аналогично (5). Исключением является использование матриц $\mathbf{U}^{P}$.

Таким образом, изменяя матрицы скалярного произведения, можно моделировать подобласти печатных проводников с применением кратномасштабного временного метода. Данный метод не сильно замедляет вычисления и ему необходима дополнительная память только для хранения матриц **U**.

Список литературы

1. *E.M.Tentzeris, A.Cangellaris, L.P.B.Katehi, and J.Harvey, "Multiresolution Time-Domain (MRTD) Adaptive Schemes Using Arbitrary Resolutions of Wavelets", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., (50), pp.501–516, Feb. 2002.*
2. *T.Dogaru and L.Carin, "Application of Haar-wavelet-based multiresolution time-domain schemes to electromagnetic scattering problems", IEEE Trans/ Antennas Prop., (50), pp.774–784, June 2002.*
3. *Логвинов А.М., Перепелкин И.Н., Травин М.Г. Математическое моделирование распознавания случайных сигналов на основе вейвлет-преобразования Хаара. // Информационные технологии моделирования и управления, – 2007, – № 7(41). – С. 795-802.*
4. *Перепелкин И.Н. Кратномасштабный временной метод анализа полосковых резонансных СВЧ-антенн. // Информационные технологии моделирования и управления, – 2007, – № 6(40). – С. 740-748.*

УДК004.051, 004.9, 06.3, 06.4.10, 07.5.10
ББК 20

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ СОЦИАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ПОРТАЛОВ ЭЛЕКТРОННОГО УЧАСТИЯ [1]

*© **Л.А. Видясова**, Университет ИТМО (г. Санкт-Петербург, Россия)*

CRITERIA FOR ASSESSING SOCIAL EFFECTIVENESS OF TECHNICAL SYSTEMS THE CASE OF E-PARTICIPATION PORTALS

*© **L.A. Vidiasova**, ITMO University (St. Petersburg, Russia)*

Статья посвящена актуальной проблеме разработки критериев оценки социальной эффективности порталов электронного участия в России. В статье приводятся результаты международных исследований, а также данные экспертного опроса, проведенного в России. Опрос экспертов был посвящен факторам развития электронного участия в России и критериям оценки прогресса в данной области. В настоящей статье автор делает выводы о наборе количественных и качественных критериев эффективности порталов электронного участия.

Ключевые слова: порталы электронного участия, органы государственной власти, социальная эффективность, критерии оценки

[1] *Работа выполнена в рамках проекта «Исследование социальной эффективности порталов электронного участия в России» при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 16-36-60035).*

The article is devoted to the urgent issues of developing the criteria for e-participation portals' social effectiveness assessment in Russia. The article presents the results of international studies, as well as data from an expert survey conducted in Russia. The survey was devoted to the factors of e-participation development in Russia and the criteria for assessing the progress in this field. In this article, the author draws conclusions about a set of quantitative and qualitative criteria to assess e-participation portals' efficiency.

Key words: e-participation portals, authorities, social efficiency, assessment criteria

E-mail: bershadskaya.lyudmila@gmail.com, ylpolina@yandex.ru

Электронное участие в последние годы стало популярным термином. Под электронным участием в данной статье понимается комплекс методов и инструментов, обеспечивающих электронное взаимодействие граждан и органов власти с целью учета мнения граждан в государственном и муниципальном управлении при принятии политических и управленческих решений.

При широком распространении данного комплекса инструментов, представленного порталами электронных петиций, площадками электронных обращений, системами электронного голосования и т.д., возникает вопрос о критериях оценки их эффективности, и прежде всего, эффективности социальной. Под социальной эффективностью порталов электронного участия понимается способность реализовать публично заявленные цели, достичь результатов, соответствующих потребностям населения и доступных заинтересованным в них лицам, при наиболее полном использовании условий и факторов.

Для определения критериев социальной эффективности автором статьи был проведен сравнительный анализ 15 международных и 3 российских методик, применяемых для оценки электронного участия. В число международных методик вошли следующие.

- Индекс электронного участия ООН[1].
- Показатели оценки развития информационного общества Евросоюза [2].
- Индикаторы мониторинга электронных сервисов TNS [3].
- Индикаторы публичного доверия к правительству Г. Беланше и В. Казало Арино [4].
- Факторы создания общественной ценности К. Карунасен и Х. Денг [5].
- Институциональные и технологические детерминанты В. Джо и К. Сонг [6].
- Индикаторы использования web 2.0 в правительства Ю. Сиварайджан, З. Ирани, В. Виракоди [7].
- Показатели воздействия электронного участия на управление Ю. Джен, Х. Шатхер, М. Хольцер [8].
- Показатели эффективности электронного участия Дж. Мэй, Х. Лео, А. Таудес [9].
- Структура оценки электронного участия Э. Макинтош [10].
- 5-ти уровневая система электронного участия Л. Терьян и А. Дробняк [11].
- Комплексная методика измерения и оценки электронного участия (МЕТЕР) Департамента ООН по экономическим и социальным вопросам [12].
- Ценности электронного участия Р. Шроетерра, О. Шил, О. Ренн, П. Швайзер [13].
- Индикаторы оценки государственных веб-сайтов с позиции публичных ценностей Н. Каркин и М. Янссен [14].
- Индикаторы эффективности, воздействия и продуктивности электронного участия М. Виммер, С. Перец Эспез и Дж. Морено-Джименез [15].

В состав российских методик оценки вошли.

- Индекс качества обратной связи В. Якимец и М. Леоновой [16].
- Индекс оценки и мониторинга публичной политики В. Якимец [17].
- Моделирование политической стабильности А. Ахременко [18].

Сопоставление методик проводилось путем анализа покрытия используемыми в них индикаторами 4-х измерений (политическое, экономическое, социальное и технологическое) и 3-х категорий внутри каждого измерения (наличие, использование, воздействие).

Анализ методик позволил сделать вывод о том, что исследовательские команды чаще всего развивают свой собственный инструмент, не обращаясь к позитивному опыту своих предшественников и стараясь покрыть измерение отдельных, интересных для них компонентов. Результаты оценки отдельных практик на местном уровне не транслируются на оценку проектов более широкого формата. На данный момент отсутствует комплексная методика оценки эффективности системы электронного участия, в существующих методиках крайне мало внимания уделяется взаимоотношениям между стейкхолдерами и достигаемым социальным эффектам.

В результате были выделены 5 методик, покрывающих наибольшее количество сфер: индекс электронного участия ООН, МЕТЕР; структуры оценки электронного участия Э. Макинтош; оценка ценностей электронного участия Р. Шроетерра и коллег; индикаторы оценки веб-сайтов с позиции публичных ценностей Н. Каркина и М. Янссена.

Далее на основании анализа стратегических документов, затрагивающих сферу электронного взаимодействия граждан и власти, были выделены сферы основного внимания в России, имеющие четкие цели и индикаторы их достижения. К таким сферам относятся: каналы электронного участия, административный уровень, удовлетворенность граждан, вовлеченность граждан, статистические показатели, индикаторы оценки технологической инфраструктуры, публикация открытых государственных данных, кибербезопасность, оценка разных типов электронного участия, социальные и экономические эффекты.

Отобранные методики были протестированы применительно к отражению целей стратегических нормативных документов в России. По результатам сопоставления, ни одна из методик не отражает оценку всех обозначенных сфер. Оценка технологической инфраструктуры и статистических показателей оказались наиболее популярными. Удовлетворенность граждан и их вовлечение оценивают лишь 2 методики. Измеряемые экономические эффекты сводятся, по большей мере, к оценке снижения издержек, что только частично отражает заявленные цели. Вопросы конфиденциальности данных и кибербезопасности не были отражены ни в одной из методик. Административный уровень частично охвачен индикаторами в части стиля руководства и организационного устройства, но не использования электронных подписей и документов и полученных вследствие этого эффектов.

В результате сравнительного анализа было установлено, что только одна из предложенных методик – Комплексная методика измерения и оценки электронного участия (МЕТЕР), позволяет оценивать индикаторы эффективности, однако и она не лишена недостатков. В частности, не покрытыми измерением остаются области воздействий новых технологий на процессы в обществе, экономические показатели и достижение общественных ценностей. На эти направления будет сделан основной упор при разработке методики оценки социальной эффективности порталов электронного участия в России на следующем этапе проекта.

Кроме того, автором в августе-сентябре 2016 года был проведен экспертный опрос, направленный на исследование факторов, влияющих на развитие электронного участия в России. Опрос был проведен среди представителей органов власти и НКО, ответственных за функционирование порталов электронного участия, а также активных пользователей, размещающих свои предложения и петиции на порталах. В ходе исследования организаторами был опрошен 41 эксперт из различных регионов. Среди экспертов были представители органов государственной власти (39%), научно-образовательных структур (31,7%), а также некоммерческих организаций и частных компаний (9,8% и 12,2% соответственно). Также 7,3% опрошенных не отнесли себя ни к одному из вышеперечисленных типов организаций. Основным критерием для отбора экспертов было наличие у них опыта работы в предметной области. Среди опрошенных экспертов 15% более 10 лет занимаются проектами в сфере электронного правительства и электронного участия, 34%- имеют опыт от 6 до 10 лет, 37% - вовлечены в тематику 3-5 лет, 12% - 1-3 года и 2% опрошенных имеют опыт менее одного года (в данную группу попали активные пользователи порталов участия). Экспертный опрос проводился в форме интервьюирования экспертов, а также в форме заполнения он-лайн анкеты, размещенной на площадке для проведения опросов Anketolog.

В ходе исследования экспертам было предложено в свободной форме сформулировать, какие критерии эффективности и успешного развития инструментов электронного участия, по их мнению, наиболее применимы для оценки в России. Ответы экспертов позволили систематизировать предложенные критерии на количественные и качественные (таблица 1).

Таблица 1 – Критерии оценки эффективности порталов электронного участия. Источник: экспертные оценки, результаты опроса в России, 2016 г.

Количественные критерии	**Качественные критерии**
- количество вовлеченных участников (в т.ч., например, количество участников одного опроса/обсуждения), - количество лет опыта, - количество поданных обращений и инициатив, количество активных пользователей, - доля успешных кейсов (решенных проблем, завершенных инициатив), - скорость (время реакции) на инициативы/обращения, длительность решения проблем, - количество удовлетворенных пользователей, - процент принятых органами власти нормативно-правовых актов по инициативам граждан, - число посещений портала.	- подключение «VIP и госструктур в процесс», - обсуждение только релевантных тем, - постоянное обновление дизайна, - свобода дискуссии, - простота и удобство регистрации и участия, - безопасность регистрации и участия, - реальное подтверждение решения проблем, - доступность 24/7, - логичный интерфейс, - наличие высоких оценок качества оказываемых услуг (опросы населения, оценка пользователей), - высокий уровень интеграции с социальными сетями.

В целом, следует отметить, что указанные экспертами критерии так или иначе сводятся к результативности как ожидаемому эффекту от реализации подобных инструментов: оперативному и качественному удовлетворению запросов и обращений граждан. Таким образом, эксперты отметили важность составления комплексных критериев оценки, включающие такие параметры, как востребованность инструментов электронного участия, доверие к инструментам электронного участия, открытость, полнота охвата реализуемыми инструментами

потребностей в обществе, качественные изменения по результатам применения инструментов электронного участия, учет мнения и воли граждан, уровень заинтересованности граждан в электронном участии и улучшении ситуации, уровень развития среды, обеспечивающей такую возможность, степень влияния на реальное принятие решений.

По итогам проведенного анализа были выработаны следующие требования к набору критериев оценки социальной эффективности порталов электронного участия в России:

- целесообразно использовать отдельные критерии из методики METEP;
- необходимы критерии, оценивающие достижение стратегических целей;
- оценка давать возможность устанавливать причинно-следственные связи между затраченными ресурсам и достигнутыми социальными и экономическими эффектами;
- при оценки должны агрегироваться результаты использования различных инструментов (статистика, мониторинг обратной связи, веб-аналитика, экспертиза);
- комплексный набор индикаторов оценки порталов электронного участия должен включать институциональные рамки, развитие новых технологий, использование гражданами и их удовлетворенность, аккумулирование гражданской активности, результативность обращений, создаваемые общественные ценности.

Список литературы

1. *E-Government Survey 2016: E-Government in Support of Sustainable Development. United Nations Report, 2016. URL: http://workspace.unpan.org/sites/Internet/Documents/UNPAN96407.pdf*
2. *Measuring the Information Society in the EU, the EU Accession Countries, Switzerland and the US, SIBIS Book, 2002. URL: http://www.eurosfaire.prd.fr/ist/documents/pdf/Sibis_Pocketbook_updt.pdf*
3. *E-Government Usage by the adults of 31 countries, Taylor Nelson Sofres (TNS), 2002. URL: http://www.tnsofres.com/,http://www.tnsofres.com/gostudy2002/index.cfm*
4. *Belanche G.D., Casaló Arino L.V. Rebuilding public trust in government administrations through e-government actions. Revista Espanola de Investigacion en Marketing ESIC, 19, 1, 2015.pp.1-11.*
5. *Karunasena K., Deng H. Critical factors for evaluating the public value of e-government in Sri Lanka. Government Information Quarterly, 29, 2015.pp.76-84.*
6. *Jho W., Song K. Institutional and technological determinants of civil e-Participation: Solo or duet? Government Information Quarterly, 32, 2015. pp.488-495.*
7. *Sivarajah U., Irani Z., Weerakkody V. Evaluating the use impact of Web 2.0 technologies in local government. Government Information Quarterly, 32, 2015.pp. 473-487.*
8. *Zheng Y., Schachter H.L., Holzer M. The impact of government from e-participation: A study of New Jersey municipalities. Government Information Quarterly, 3, 2014. pp.653-659.*
9. *May J., Leo H., Taudes A. Evaluation of e-participation efficiency with biodiversity measures- the case of the digital agenda Vienna. Proceedings of CEDEM Conference, 2015. URL: http://epub.wu.ac.at/4479/1/Final_version.pdf*
10. *Macintosh A., Whyte A. Towards an Evaluation Framework for eParticipation. Transforming Government: People, Process and Policy, 2 (1), 2008. pp. 16-30.*

11. *Ter'an L., Drobnjak A. An Evaluation Framework for eParticipation: The VAAs Case Study. International Scholarly and Scientific Research and Innovation, 7, 2013.pp.77-85.*
12. *Measuring and Evaluating e-Participation (METEP): Assessment of Readiness at the Country Level. UNDESA Working Paper. 2013. URL: http://workspace.unpan.org/sites/Internet/Documents/METEP%20framework_18%20Jul_MOST%20LATEST%20Version.pdf*
13. *Schroetera R., Scheel O., Renn O., Schweizer P. Testing the value of public participation in Germany: theory, operationalization and a case study on the evaluation of participation, Energy Research & Social Science, 2015. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.013*
14. *Karkin N., Janssen M. Evaluating websites from a public value perspective: a review of Turkish local government websites. International Journal of Information Management, 34, 2014. pp.351-363.*
15. *Perez Espes C., Moreno-Jimenez J.M., Wimmer M.A. Evaluating the efficacy of e-participation experiences, Lecture Notes in Informatics 221,2013. pp. 250-258. GI-Edition. ISBN: 978-3-88579-615-2.*
16. *Yakimets V.N., Leonova M.V. The composite index assessing the effectiveness of information resources feedback of the Russian federal authorities. Proceedings of "Internet and modern society conference", 2007.pp.217-220.*
17. *Yakimets V.N. Index for public policy evaluation in the Russian regions. Proceedings of the Russian Science Academy ISA, 26, 2006.P. 139-147. URL: http://www.isa.ru/proceedings/images/documents/2006-25/139-147.pdf*
18. *Akhremenko A.S. A dynamic approach to the mathematical modeling of political stability. Political Studies, 3, 2009. P.105-112.*

УДК 004.92
ББК 22

АЛГОРИТМ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ НОВОГО МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ БУМАЖНЫХ ДОКУМЕНТОВ

© ***Л.С. Беккель,*** *Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Калуга, Россия)*
© ***В.Д. Шкилев,*** *Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Калуга, Россия)*

ALGORITHM OF AUTOMATED SYSTEM OPERATION FOR A NEW METHOD OF PAPER DOCUMENTS IDENTIFICATION

© ***L.S. Beckel,*** *Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga, Russia)*
© ***V.D. Schilev,*** *Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga, Russia)*

Статья посвящена описанию принципов получения стохастических меток и работы автоматизированной системы идентификации их изображений. Необходимость разработки нового метода идентификации вызвана высокими темпами развития информационных технологий, позволяющих произвести фальсификацию бумажных документов на высоком уровне. Для нанесения метки использовался электроразрядный метод, придающий ей уникальность. Разработанная автоматизированная система идентификации позволяет произвести идентификацию изображений

меток с помощью сравнения их QR-кодов с оригиналами меток и исключить возможность неточного распознавания информации.

Ключевые слова: стохастически нанесенная метка, бинаризация, автоматизированная система идентификации изображений

The article is devoted to the description of the principles of obtaining stochastic tags and the work of an automated system for identifying their images. The need to develop a new identification method is due to the high rate of information technology development, which makes it possible to make falsification of paper documents at a high level. The electric discharge method was used to apply a unique tag. The developed automated identification system makes it possible to identify tag images by comparing their QR codes with the originals of tags and to exclude the possibility of inaccurate recognition of information.

Key words: the stochastically applied tag, binarization, automated system of image identification.

E-mail: milla2606@rambler.ru

В статье приводится описание алгоритма работы программного продукта – автоматизированной системы, предназначенной для идентификации стохастически нанесенных на бумажные документы меток, полученных электроразрядным способом. Эти метки при необходимости позволят с высокой степенью точности отличить истинный документ от фальсифицированного [1]. В настоящее время решение задачи идентификации бумажных документов является наиболее актуальной проблемой: развитие информационных технологий позволяет произвести фальсификацию на высочайшем уровне, и в условиях рыночного производства отследить подделки становится все труднее.

При проведении исследований методов идентификации объектов привлекли внимание способы, основанные на стохастических физических процессах. Они позволяют получить большую достоверность результатов по сравнению с существующими методами автоматической идентификации (технологии штрихового кодирования, радиочастотной идентификации, карточные технологии, биометрические технологии, технологии машинного зрения), которые не могут обеспечить создание индивидуальной метки для выделения объекта из его класса и не исключают возможности фальсификации. Однако существующие до настоящего момента стохастические способы идентификации не обеспечивают достаточную надежность: например, вкрапление мелко нарезанных оптических волокон не смогло послужить надежным идентификатором денежной купюры. При обращении купюры хрупкость волокон привела к быстрому изменению спекл-структуры [2]. Кроме того, для своего осуществления эти способы требуют использования дорогостоящих технологий [3].

Поэтому авторами был предложен к использованию метод идентификации бумажных документов, основанный на нанесении меток электроразрядным способом, являющимся эффективным инструментом воздействия на материалы. Электроразрядный способ нанесения метки представляет собой прожигание бумажного носителя быстродействующей вспышкой разряда между электродами различной полярности [4]. При этом один из электродов прикреплен к бумажному носителю, другой является инструментом. Стохастический характер появления прожженных отверстий разного диаметра на поверхности носителя объясняется неустойчивостью процесса разряда и микронеоднородностями газовой среды: в воздухе присутствуют проводящие включения, что способствует уходу траектории канала разряда от кратчайшего пути (попадания искр в одну точку) (рисунок1) [5].

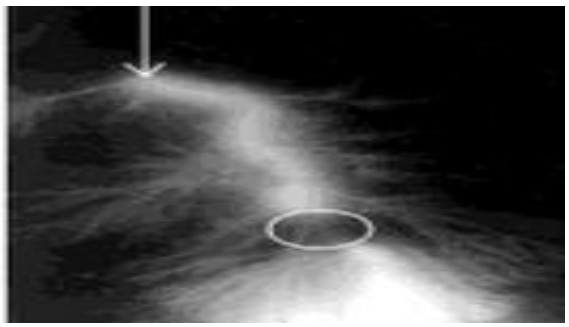


Рисунок 1 – Траектория разряда при наличии проводящих включений [5]

При пробое межэлектродного промежутка электрическая энергия переходит в тепловую. Нестационарное поле температур, образованное в зоне разряда, обеспечивает появление в стохастическом порядке на поверхности носителя отверстий, размеры которых в большой степени зависят от энергии разряда.

Получение меток (совокупностей отверстий на мишенях) осуществлялось на собранной авторами установке (рисунок 2). Форма выбранных электродов оказывает большое влияние на однородность создаваемого в межэлектродном промежутке электрического поля. Например, при применении двух плоскостей или сфер с расстоянием между ними, не превышающим их диаметр, в межэлектродном промежутке устанавливается однородное электрическое поле. Для обеспечения неоднородности поля эксперименты проводились и с электродами в виде острия и плоскости, двух проводов, сферических поверхностей, при этом расстояние между ними было больше радиуса сферы. Рассматривались также и два острия.

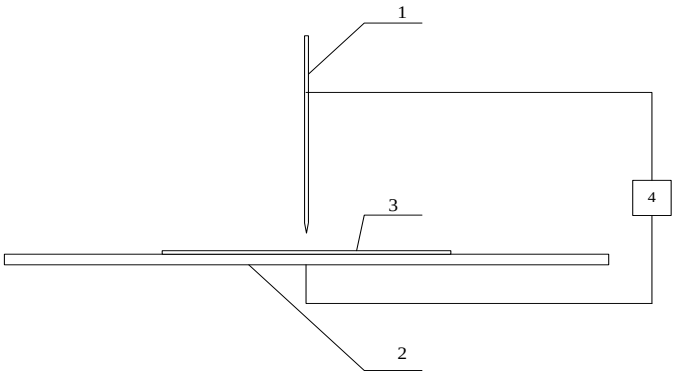


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки: 1, 2 – электроды, 3 – бумажный носитель с нанесенной мишенью и серийным номером, 4 – высоковольтный источник

Авторами были проведены эксперименты с выбором материалов электродов. Общеизвестны следующие материалы для изготовления электродов: медь М1, М2; латунь ЛС-62; алюминий и его сплавы Д1, Ал3, Ал5; чугун; углеграфитированный материал марки ЭЭГ; вольфрамомедные композиционные металлокерамические сплавы [6]. На окончательный выбор материала электрода повлияли быстрота их износа (износ выше у латуни, алюминия и его сплавов), простота формы (углеграфитированный материал, вольфрамомедные

и композиционные металлокерамические сплавы применяют только при сложной форме электродов), величины максимального напряжения пробоя и межэлектродного промежутка. Кроме того, оказали влияние температурные деформации технологической системы. Таким образом, были выбраны медные электроды, с помощью которых были получены метки для идентификации разработанной автоматизированной системой.

При определении напряжения пробоя воздуха в межэлектродном промежутке невозможно было применить точные теоретические расчеты, так как на настоящий момент эта методика отсутствует. Поэтому авторам пришлось воспользоваться ориентировочным определением пробивного напряжения. На рисунке 3 приведена зависимость максимального пробивного напряжения от произведения давления газа на величину межэлектродного промежутка при выборе в качестве электродов двух сфер или плоскостей.

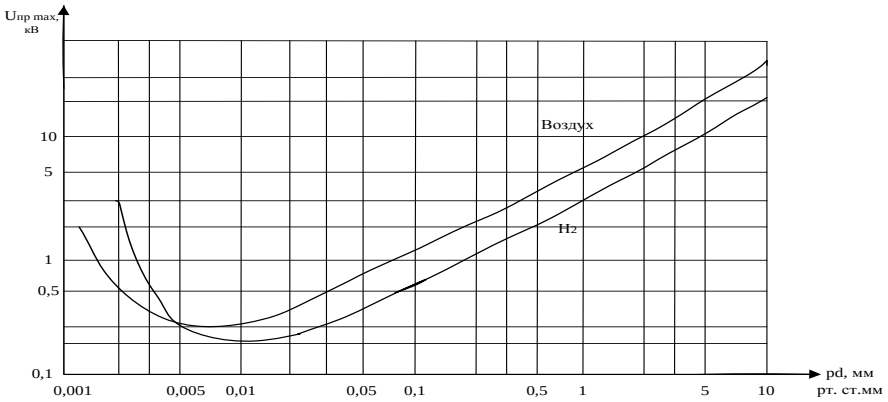


Рисунок 3 – Зависимость максимального пробивного напряжения при частоте 50 Гц и температуре 20°С от произведения давления газа p на длину межэлектродного промежутка d для воздуха и водорода [7]

Для электродов – двух сфер, величина межэлектродного промежутка между которыми не превышала диаметра сферы, напряжение пробоя определялось по следующей эмпирической зависимости [8]:

$$U_{\text{пр}} = \frac{27{,}2d\delta\left(1+\frac{0{,}54}{\sqrt{r\delta}}\right)}{0{,}25\left[\frac{d}{r}+1+\sqrt{\left(\frac{d}{r}+1\right)^2+8}\right]}, \text{ кВ}, \quad (1)$$

где d – величина межэлектродного промежутка, см, r – радиус сферы, см.

На максимальное значение напряжения пробоя существенное влияние оказывает также полярность электродов. Например, для системы электродов острие – плоскость вид зависимости напряжения от величины межэлектродного промежутка при острие – катоде значительно отличается от вида кривой, полученной при выборе острия в качестве электрода – анода (рисунок 4).

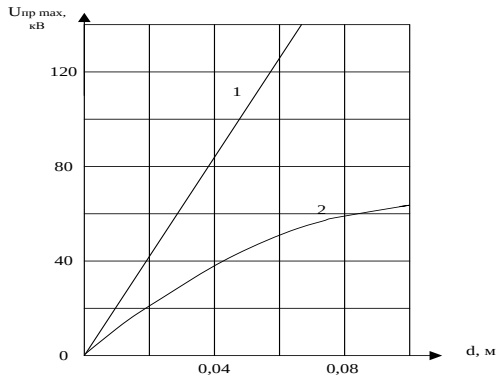


Рисунок 4 – Зависимость значения максимального пробивного напряжения от длины межэлектродного промежутка d при острие – катоде (кривая 1) и положительной полярности острия (кривая 2) [9]

В результате проведенных экспериментов на бумажных носителях был получен ряд меток в виде стохастически прожженных отверстий, каждая метка имела невоспроизводимый характер.

Для получения изображения метки необходимо произвести его захват с помощью камеры считывателя (в простейшем случае с помощью камеры сотового телефона). В итоге получаем цифровой цветной снимок изображения метки.

С целью дальнейшей обработки полученных изображений меток предлагается к использованию программный продукт, разработанный в среде *Microsoft Visual Studio* на языке программирования C#, – автоматизированная система идентификации изображений, алгоритм работы которой приведен на рисунке 5.

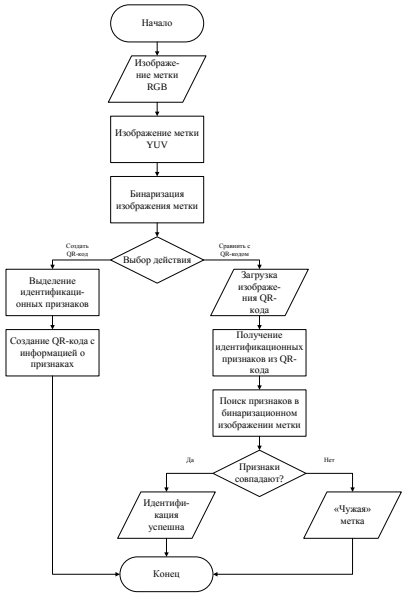


Рисунок 5 – Алгоритм работы автоматизированной системы

Для преобразования изображения метки в ее математическую модель, в которой идентификационные признаки будут сохраняться в виде алфавитно-

цифровой кодировки (из-за возможности использования букв в записи индивидуального серийного номера метки), необходимо осуществить ряд процедур:

- полученное цветное изображение метки RGB (аббревиатура английских слов Red, Green, Blue – красный, зеленый, синий) с помощью конверсии перевести в цветовую модель YUV (Y – яркостная, U и V – цветоразностные составляющие);
- провести бинаризацию – операцию порогового разделения, когда исходное полутоновое изображение, имеющее некое количество уровней яркости, преобразуется в черно-белое изображение, пиксели которого имеют только два значения – 0 и 1 [10]. Эта процедура необходима для четкого разделения белых и темных областей (отверстий метки и фона мишени) [3].

При выборе процедуры создания QR-кода (англ. quick response – быстрый отклик) автоматизированная система приступает к выделению идентификационных признаков, объективно отображающих свойства метки. Для четкого разграничения признаков идентификации авторы руководствовались следующими требованиями к идентификаторам [11]:

- признак должен отразить индивидуальность метки, качественное и количественное ее отличие от других однородных и сходных по общим признакам полученных изображений меток;
- признак должен обладать относительной устойчивостью. В течение всего периода идентификации метка должна обеспечить сохранность своих свойств;
- совокупность признаков должна быть достаточной для осуществления процесса идентификации метки;
- признак должен обладать допустимостью – предусмотреть средства и возможность его исследования;
- признак должен быть воспроизводимым – он должен обладать способностью к неоднократному отображению (например, количество стохастически нанесенных отверстий). Отображение признака должно передать исчерпывающую информацию о свойстве метки;
- выраженность признака позволит убедиться в его наличии.

В соответствии с перечисленными требованиями в качестве идентификационных признаков были выбраны серийный номер изображения метки, количество полученных электроразрядным способом отверстий, координаты центров масс отверстий. Все идентификаторы отражают индивидуальность метки, обладают относительной устойчивостью, допустимостью, выраженностью. Совокупность признаков является достаточной для передачи уникальной информации метки и вывода об ее идентификации.

Полученные идентификационные признаки заносятся в разрабатываемый в следующей процедуре QR-код, технология программирования которого несколько изменена для сокрытия от фальсификаторов служебной информации – перечня идентификаторов и порядка их записи.

При выборе процедуры сравнения ранее созданного QR-кода с изображением метки происходит загрузка изображения QR-кода с информацией об идентификационных признаках, считывание которых осуществляется в следующей процедуре. Затем производится поиск идентификаторов в бинарном изображении метки.

При осуществлении сравнительного исследования признаков QR-кода и бинарного изображения метки происходит сопоставление выявленных идентификаторов с целью обнаружения совпадающих и различающихся свойств.

Оценка полученных результатов по набору идентификационных признаков позволяет сделать вывод о тождестве или отличии сопоставленных объектов.

Таким образом, предлагаемый метод идентификации бумажных документов, основанный на использовании электроразрядного способа для получения метки на носителе, является весьма надежным. Для отработки наиболее эффективной технологии метода авторами были проведены эксперименты по выбору материалов и формы электродов, их полярности, значения максимального напряжения пробоя и величины межэлектродного промежутка. Результаты проведенных экспериментов показали, что при использовании определенной технологии данного метода каждому документу будет присвоена уникальная невоспроизводимая метка. Разработанный программный продукт – автоматизированная система даст возможность произвести обработку изображений меток, создать их QR-код и осуществить идентификацию бумажных документов (подана заявка на получение патента) с целью обнаружения истинных объектов и выявления фальсифицированных документов с «чужими» метками.

Список литературы

1. *Шкилев В.Д. Мартынюк Н.П., Адамчук А.Н. Научное открытие в области интерференции искрового разряда №421 // Научные открытия 2011. Сборник кратких описаний научных открытий. – М.: РАЕН, 2012. – С. 46-47.*
2. *Kravolec. Plastic tag makes foolproof ID // Technology Research News. – 2002. Vol. 2. Pp.75–85.*
3. *Беккель Л.С., Шкилев В.Д. Концепция разработки метода идентификации объекта по его невоспроизводимой стохастически нанесенной метке // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Научно-методический журнал. Пенза: Пенз. Гос. Технолог. Университет. – 2016. №06 (34). С. 184-187.*
4. *Беккель Л.С., Шкилев В.Д. Анализ и обработка изображений стохастически нанесенных меток // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Научно-методический журнал. Пенза: Пенз. Гос. Технолог. Университет. – 2016. №06 (34). С. 30-34.*
5. *Лопатин В.В., Сквирская И.И. Электрический разряд и его технологические применения // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 1. – С. 128 – 132.*
6. *Поляков З.И. Электрофизические и электрохимические методы обработки: учебное пособие / З.И. Поляков [и др.] Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 89 с.*
7. *Воробьев Г.А. Физика диэлектриков (область сильных полей): учебное пособие / Г.А. Воробьев – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2003. – 242 с. 8.Бутенко В.А. Техника высоких напряжений: учебное пособие / В.А. Бутенко [и др.] – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 118 с.*
8. *Прахова М.Ю., Ишинбаев Н.А. Электротехнические материалы: учебное пособие / М.Ю. Прахова, Н.А. Ишинбаев – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. – 139 с.*
9. *Ping-Sung Liao, Tse-Sheng Chen, Pau-Choo Chung. A Fast Algorithm for Multilevel Thresholding // J. Inf. Sci. Eng. – 2001.Vol. 17 (5). – Pp. 713–727.*
10. *Колдин В.Я. Идентификация при производстве криминалистических экспертиз / В.Я. Колдин. – М.: Госюриздат, 1957. – С. 7.*

УДК 004.92
ББК 22

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ СТОХАСТИЧЕСКИ НАНЕСЕННЫХ МЕТОК

© ***Л.С. Беккель,*** *Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Калуга, Россия)*
© ***В.Д. Шкилев,*** *Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Калуга, Россия)*

ANALYSIS OF THE AUTOMATED SYSTEM RESULTS OF STOCHASTICALLY APPLIED TAGS IDENTIFICATION

© ***L.S. Beckel,*** *Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga, Russia)*
©***V.D. Schilev,*** *Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga, Russia)*

Статья посвящена анализу результатов работы программного продукта – автоматизированной системы идентификации. Эта система предназначена для идентификации бумажных документов. В функции системы входят обработка и идентификация изображений меток, стохастически нанесенных на бумажные документы электроразрядным методом для придания уникальности документу. Результаты работы автоматизированной системы показали высокое качество обработки изображений и идентификации меток, что позволит исключить возможность фальсификации информации.

Ключевые слова: стохастически нанесенная метка, автоматизированная система идентификации изображений, гистограмма.

The article is devoted to the analysis of the results of the software product work - the automated identification system. This system is designed to identify paper documents The functions of the system includes the processing and identification of image tags stochastically applied to paper documents by the electric discharge method to make the document unique. The results of the automated system showed high quality of image processing and identification of tags, which would exclude the possibility of information falsification.

Key words: stochastically applied tag, automated image identification system, histogram.
E-mail: milla2606@rambler.ru

В статье приводятся результаты функционирования разработанной и предлагаемой к использованию автоматизированной системы, предназначенной для идентификации бумажных документов. Эта проблема существует с давних времен и до настоящего времени не существовало достаточно надежного способа выявления оригинала [1]. Поэтому для придания уникальности документу авторами был предложен новый метод, базирующийся на использовании электроразрядного способа [2]. При использовании предложенного метода на поверхности бумажного носителя появляется невоспроизводимая метка, имеющая вид стохастически разбросанных прожженных отверстий [3]. Невоспроизводимость метки объясняется характером применяемого электроразрядного способа: неустойчивостью процесса разряда и присутствию в межэлектродном промежутке проводящих включений [4]. Технология метода включает, кроме получения метки, считывание ее серийного номера и создание QR-кода, наносимого на бумажный документ поблизости от метки и позволяющего произвести сравнение его идентификационных признаков с информацией метки.

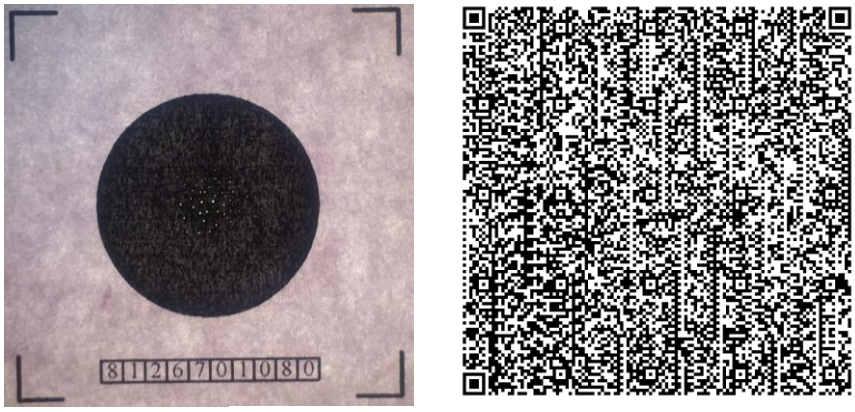
Основная сложность реализации предлагаемого метода заключалась в создании автоматизированной системы, в функции которой входят обработка

изображений меток, выделение идентификационных признаков, создание QR-кода метки с занесением этих признаков, сравнение кода с изображением меток, анализ идентификации изображений.

Для осуществления самого ответственного этапа идентификационного исследования – анализа результатов были выбраны признаки – идентификаторы меток, оцененные с позиции их значимости, устойчивости [5]. Кроме того, на каждый идентификатор не должны оказывать влияние ни естественное изменение состояния метки за период эксплуатации бумажного документа, ни способ получения изображения (сканирующее устройство, камера сотового телефона), ни освещенность объекта в процессе получения его изображения (независимость от времени суток). С учетом этих рекомендаций, в качестве идентификаторов были приняты серийный номер метки, количество полученных отверстий, координаты их центров масс и размеры.

Заключение об идентификации производилось на основе анализа совпадающих значений совокупности признаков. При полном совпадении значений или небольшом их отклонении (в пределах 5 %) можно судить о тождестве меток. В противном случае, при одновременном значительном различии величин идентификаторов делаем вывод об отрицательном результате идентификации объектов: следовательно, метка – «чужая».

На рисунке 1,а изображена отобранная для иллюстрации процедуры идентификации фотография метки с серийным номером 8126701080. Созданный автоматизированной системой ее QR-код (рисунок 1,б) выбран в качестве оригинала для сравнения его идентификационных признаков с фотографиями этой же метки, произведенными в условиях разной освещенности.



а) *б)*

Рисунок 1 – а) фотография метки с серийным номером 8126701080; б) QR-код этой метки, созданный автоматизированной системой

При проведении идентификационного исследования для чистоты экспериментов фотографии меток были сделаны камерой обычного сотового телефона среднего класса, бывшего в употреблении 2 года. Понятно, что такая камера не предназначена для профессионального фотографирования. Но результаты работы автоматизированной системы превзошли ожидания.

Процедура идентификации QR-кода оригинала с фотографиями метки, произведенными в условиях яркой освещенности, показала их идентичность (рисунок 2).

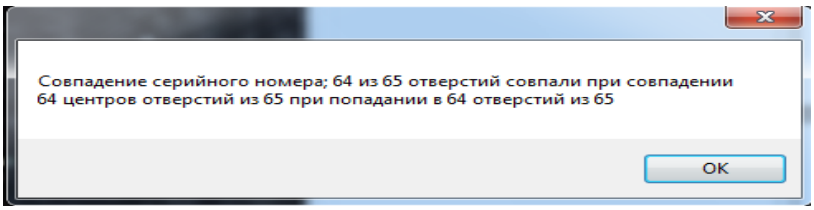


Рисунок 2 – Вывод результатов сравнения фотографий метки, сделанных в условиях яркой освещенности, с ее QR-кодом – оригиналом

Кроме того, эксперименты проводились с фотографиями меток после эксплуатации бумажных носителей в течение 6 месяцев (рисунок 3). За этот период были сделаны доклады о проведенном анализе работы автоматизированной системы на заседаниях кафедры, конференциях, при контакте коллег с метками, тщательном их рассматривании. На рисунке 3 показаны результаты идентификации QR-кода – оригинала метки с фотографиями этой же метки, сделанными в разных условиях. Столбики гистограммы под номерами 1, 2, 5 иллюстрируют полную идентичность кода с фотографией метки, сделанной в условиях яркой освещенности в разное время суток, по совокупности признаков – количеству отверстий, их размерам и координатам положения центра масс.

Фотография, результат идентификации которой представлен столбиками № 3, оказалась засвеченной, что сразу было видно по ее изображению на экране монитора. При выводе на экран монитора следующей фотографии (№ 4) четко были видны полосы, свидетельствующие о совпадении частоты излучения лампы подсветки метки с частотой телефона, что также свидетельствовало о плохом качестве фотографии. Но было принято решение провести анализ идентификации и этих фотографий для выяснения влияния качества фотографий метки на результат распознавания изображений.

Столбики гистограммы № 6, 7, 8 содержат результаты сравнения фотографий метки, сделанных в пасмурный день, в разное время суток.

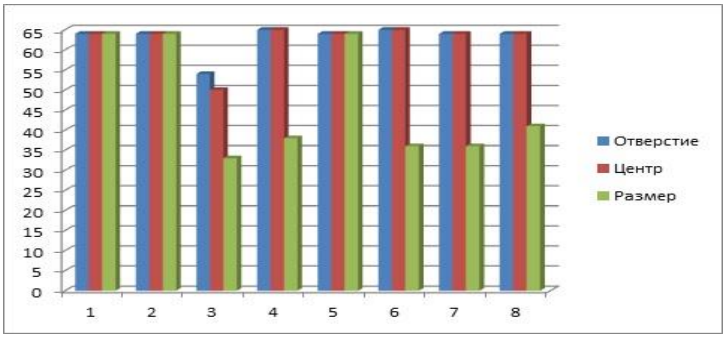


Рисунок 3 – Вывод результатов сравнения фотографий метки, сделанных в условиях разной освещенности, с ее QR-кодом – оригиналом

Изучив результаты данного исследования, авторы пришли к выводу, что наибольшей значимостью обладают критерии «количество отверстий» и «координаты центров масс отверстий» (не говоря о серийном номере метки). По ним все фотографии оказались тождественными независимо от фактора

освещенности. Отклонения по размерам отверстий (№ 3, 4, 6, 7, 8) объяснялись плохим качеством фотографий. Кроме того, метки были прожжены на мишени, однократно нанесенной чернилами лазерного принтера на простой офисной бумаге плотностью 80 г/м^2, и из-за неоднородности структуры бумаги не все отверстия совпали по размерам, что исключается в случае применения камеры сканирующего устройства для считывания изображения метки. Несмотря на такое качество фотографий, делаем вывод об успешной идентификации метки. Это подтверждается совершенно другими результатами сравнения «чужих» меток с QR-кодом метки – оригинала.

Для сравнения с QR-кодом метки – оригинала автоматизированной системой были созданы коды всех меток. При сравнении QR-кода оригинала метки с фотографиями «чужих» меток автоматизированная система, производя процедуры получения их бинарных изображений и считывания информации об их идентификационных признаках, сделала вывод об их полном несовпадении. На рисунке 4 в качестве примера приведен сделанный системой вывод о полном несовпадении фотографии одной из «чужих» меток (серийный номер 1524601084), взятых для исследования на идентичность с меткой – оригиналом под номером 8126701080.

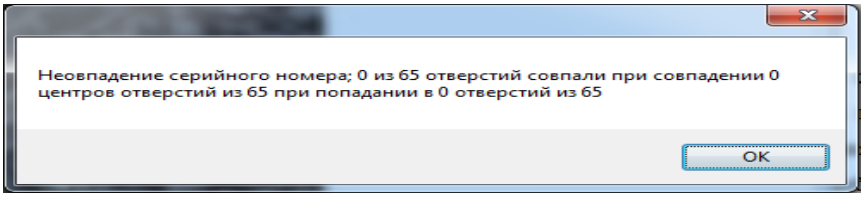


Рисунок 4 – Вывод результатов сравнения QR-кода метки с серийным номером1524601084 с бинарным изображением метки с номером 8126701080

Для составления гистограммы рисунка 5 специально из массы обработанных данных были отобраны и ненулевые результаты идентификации (например, совпадение частей двух отверстий из 65 отверстий метки столбца № 8), имеющие максимальные значения. Из гистограммы видно, что даже в случае пересечения частей отверстий кода – оригинала и «чужой» метки, эти отверстия будут резко отличаться по координатам центра массы или по размерам, или по обоим этим признакам (столбцы № 3, 4, 6, 7, 8).

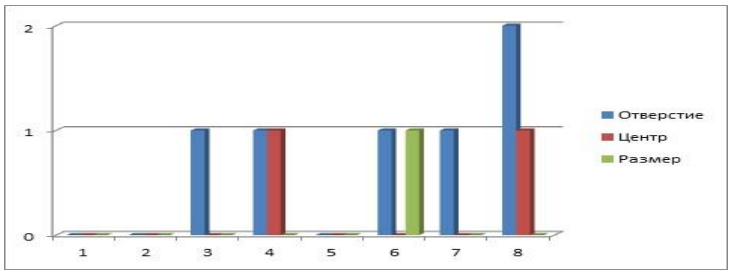


Рисунок 5 – Вывод результатов сравнения QR-кода метки с серийным номером1524601084 с бинарными изображениями «чужих» меток

Результаты проведенного исследования доказали надежность предлагаемого метода идентификации бумажных документов. Сравнение QR-кода мет-

ки, полученной электроразрядным способом, с ее же изображением через определенный срок эксплуатации показало ее полную идентичность. Факторы освещенности, учитываемые при получении фотографии метки, не оказали существенного воздействия на качество процесса идентификации. Но сравнение метки с «чужим» QR-кодом полностью отсекает попытку выдать ее за оригинал. Таким образом, новый метод электроразрядного получения метки и его реализация в виде разработанной автоматизированной системы является весьма надежным и достоверным способом идентификации бумажных документов.

Список литературы

1. *Шкилев В.Д. Мартынюк Н.П., Адамчук А.Н. Научное открытие в области интерференции искрового разряда №421 // Научные открытия 2011. Сборник кратких описаний научных открытий. – М.: РАЕН, 2012. – С. 46-47.*
2. *Беккель Л.С., Шкилев В.Д. Концепция разработки метода идентификации объекта по его невоспроизводимой стохастически нанесенной метке // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Научно-методический журнал. Пенза: Пенз. Гос. Технолог. Университет. – 2016. №06 (34). С. 184-187.*
3. *Беккель Л.С., Шкилев В.Д. Анализ и обработка изображений стохастически нанесенных меток // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Научно-методический журнал. Пенза: Пенз. Гос. Технолог. Университет. – 2016. №06 (34). С. 30-34.*
4. *Лопатин В.В., Сквирская И.И. Электрический разряд и его технологические применения // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 1. – С. 128 – 132.*
5. *Колдин В.Я. Идентификация при производстве криминалистических экспертиз / В.Я. Колдин. – М.: Госюриздат, 1957. – С. 7.*

УДК 004.932
ББК 22

СУММАРНО-РАЗНОСТНЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА СЛОЖНОМ НЕОДНОРОДНОМ ФОНЕ

© ***В.А. Кочкин***, *НИИ Радиоэлектронной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, Россия)*
© ***В.Ю. Лоскутов***, *НИИ Радиоэлектронной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, Россия)*

TOTAL-DIFFERENT ALGORITHM FOR DYNAMIC OBJECTS DETECTION ON A COMPLEX HETEROGENEOUS BACKGROUND

© ***V.A. Kochkin***, *Radio-electronic equipment research institute of Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)*
© ***V.Yu. Loskutov***, *Radio-electronic equipment research institute of Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)*

Предложен суммарно-разностный алгоритм обнаружения динамических объектов на сложном неоднородном фоне. Для оценки смещения фона предложено использовать формирование лапласианов анализируемых изображений и их разностное сравнение в точках с максимальными амплитудами.

Ключевые слова: обнаружение динамического объекта, смещениефона, оценка смещения, метод опорных точек, корреляционное сравнение, лапласиан, сложный неоднородный фон.

A sum-difference algorithm for detecting dynamic objects on a complex non-homogeneous background is proposed. To estimate the background displacement, it is suggested to use the formation of Laplacians of analyzed images and their difference comparison at points with maximum amplitudes.

Key words: detection of a dynamic object, background bias, displacement estimation, reference pointsmethod, correlation comparison, Laplacian, complex heterogeneous background.

Создание автоматических оптико-электронных систем (ОЭС) обнаружения динамических объектов (ДО) требует решения комплекса информационных задач в условиях сложной фоно-целевой обстановки (ФЦО) в реальном масштабе времени (РМВ). Применительно к ОЭС, функционирующим в условиях сложной ФЦО (фон подстилающей поверхности, облачный фон и т.п.), фоновая компонента регистрируемых изображений ФЦО характеризуется следующими свойствами: протяженность, пространственная неоднородность энергетических характеристик, неоднородность пространственно-частотных характеристик по полю зрения ОЭС, наличие неоднородной шумовой компоненты и нестационарность геометрической и энергетической структуры фона.

Пространственная неоднородность энергетических и пространственно-частотных характеристик фона определяются наблюдением в поле зрения ОЭС детерминированных природных и антропогенных объектов, имеющих различные энергетические и геометрические параметры (облачность с разрывами, подстилающая поверхность (ландшафт), кроме пространственно однородной морской или степной местности). Неоднородность шумовой компоненты связана с зависимостью интенсивности шума от энергетических и пространственно-спектральных характеристик фона, особенно на границах разрывов локально-однородных участков (границы облаков, береговая линия и т.д.). Нестационарность геометрической и энергетической структуры фона определяется относительным движением ОЭС и фона и нестационарностью энергетических характеристик фоновой компоненты (изменение структуры облачного покрова и т.д.), что приводит к появлению геометрических искажений изображения фоновой компоненты.

Применительно к работе большинства ОЭС, работающих в РМВ, можно ограничиться только одним классом геометрических преобразований фона– смещением [1 – 4].

Данное ограничение справедливо в условиях формирования изображений ФЦО в РМВ, когда выполняется условие

$$\omega_Z \cdot max\vec{r} < K\delta r, \qquad (1)$$

где ω_Z – проекция вектора угловой скорости относительного поворота ФЦО и ОЭС на нормаль к картинной плоскости ОЭС (на направление визирной оси ОЭС), $\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ – радиус-вектор координат картинной плоскости ОЭС, δr - линейный размер фоточувствительного элемента (фчэ) разложения матричного фотоприемного устройства (МФПУ) ОЭС, $K = (0{,}25...0{,}5)$ - коэффициент, учитывающий возможное изменение геометрических характеристик изображения вследствие растровой структуры МФПУ.

Условие (1) может быть представлено в виде $\omega_Z < K\dfrac{\delta r}{max\vec{r}} = \dfrac{K}{\mu}$.

Для МФПУ отношение $\mu = \frac{max\vec{r}}{\delta r} = \frac{\sqrt{N_x^2 + N_y^2}}{2}$, где N_x, N_y количество фоточувствительных элементов МФПУ.

Для тепловизионных ОЭС (формат МФПУ 640х480 фчэ) при кадровой частоте 25 – 50 Гц и значении $K = 0{,}5$ $\omega_Z < 1{,}9 \ldots 3{,}8\ ° / c$. Для телевизионных ОЭС (формат МФПУ 1280х9600 фчэ)при тех же условиях $\omega_Z < 0{,}95 \ldots 1{,}9\ ° / c$. Эти условия практически всегда выполняются в практических условиях работы.

В [2, 5] показано, что в условиях сложного пространственно-неоднородного фона перспективным классом алгоритмов обнаружения динамических объектов (ДО) являются суммарно-разностные алгоритмы, обеспечивающие обнаружение объектов при малых значениях отношения сигнал/фон.

Суммарно-разностные алгоритмы обеспечивают решение задачи обнаружения объекта по регистрируемой последовательности изображений ФЦО, длительность которой зависит от следующих факторов:

- интенсивность и сложность ФЦО;
- отношение сигнал/фон, определяемое как $\chi = \max\limits_{S_{ОБ}} B_{ОБ} \Big/ \max\limits_{S_Ф} B_Ф$, где $B_{ОБ}$, $B_Ф$ - яркость объекта и фона соответственно; $S_{ОБ}$, $S_Ф$ - области изображения ФЦО, занимаемые объектом и фоном соответственно;
- относительной скоростью движения объекта и фона.

Отношение сигнал/фон, определяется как

$$\max\limits_{S_{ОБ}} B_{ОБ} \Big/ \max\limits_{S_Ф} B_Ф, \qquad (2)$$

где $B_{ОБ}$, $B_Ф$ - яркость объекта и фона соответственно; $S_{ОБ}$, $S_Ф$ - области изображения ФЦО, занимаемые объектом и фоном соответственно.

В работе предложен алгоритм обнаружения ДО на сложном неоднородном фоне в классе суммарно-разностных алгоритмов.

Данный алгоритм определяется последовательным выполнением следующих операций:

- формирование последовательности $\left\{B^k(\vec{r}, t_k)\right\}$, $k \in (1 \ldots N)$ изображений ФЦО $B^k(\vec{r}, t_k)$, t_k - время регистрации текущего *k*- ого изображения ФЦО;
- последовательное формирование совокупности межкадровых векторов смещения изображений ФЦО $\Delta\vec{r}_{k-1,k}$;
- смещение текущих *k*-ых изображений ФЦО на величину $-\Delta\vec{r}_{k-1,k}$;
- формирование последовательности разностных изображений (РИ) $\left\{B_P^k(\vec{r}, t_k)\right\}$, $k \in (2 \ldots N)$ как $B_P^k(\vec{r}, t_k) = \left| B(\vec{r}, t_k) - B(\vec{r} - \Delta\vec{r}_{k-1,k}, t_{k-1}) \right|$;
- пороговая обработка каждого РИ с порогом h_1;

- суммирование *K* РИ с формированием суммарного изображения $B_K^S(\vec{r}) = \frac{1}{K}\sum_{k=2}^{K} B_P^k(\vec{r},t_k)$;

- пороговая обработка суммарного изображения с порогом h_S;

- выделение суммарного изображения ДО как ненулевой области суммарного изображения;

- формирование траектории движения ДО по суммарному изображению ДО;

- выделение изображения ДО и определение его координат.

Выделение изображения ДО Для последующих $(K+j)$-ых изображений ФЦО по суммарному изображению и траектории движения ДО относительно фона как следу изображения объекта на суммарном изображении $B_{S,K}(\vec{r})$, подвергнутом пороговой обработке, ее экстраполяция на момент времени t_{K+j}, формирование пространственных стробов $Str(\vec{r},K+j)$ вокруг точек экстраполированной траектории, стробирование *(K+j)*-ого РИ сформированными стробами $Str(\vec{r},K+j)$ и выделении строба ДО как ненулевой области стробированного РИ. Выделение изображения ДО и определение его координат производится посредством стробирования стробом ДО текущего *(K+j)*-ого изображения ФЦО.

Операции предложенного алгоритма в части формирования РИ, суммарного изображения, его обработки не обладают вычислительной сложностью и рассмотрены в алгоритме в работе [2]. Наибольшей вычислительной сложностью обладает операция определения вектора межкадрового смещения фона и операции выделения изображения ДО.

Анализ различных методов определения вектора межкадрового смещения фона (ВСФ) в последовательности регистрируемых изображений ФЦО $\{B_k(\vec{r},t_k)\}$, при неоднородности фона, показал эффективность корреляционных методов оценивания ВСФ $\Delta\vec{r}_{k-1,k}$ [1, 2, 5]. В данных методах смещение изображений ФЦО определяется как координата глобального экстремума критериальной функции корреляционного вида:

$$\Delta\vec{r}_{k-1,k} = \arg\underset{\vec{r}}{\operatorname{extr}}\underset{S}{} F(k-1,k,\vec{r}), \qquad (3)$$

где $F(k-1,k,\vec{r}) = F\left\{Q\{B_k(\vec{r},t_k)\},Q\{B_{k-1}(\vec{r},t_{k-1})\}\right\}$ - разностный или корреляционный функционал, определенный на $(k-1)$-и *k*–ом изображениях ФЦО; $Q\{B_k(\vec{r},t_k)\}$ - функционал преобразования k-ого изображения ФЦО (для классических алгоритмов $Q\{B_k(\vec{r},t_k)\} = \left\{B_k(\vec{r},t_k);\ \nabla B_k(\vec{r},t_k);\ \Delta B_k(\vec{r},t_k)\right\}$).

Необходимость введения функциональных преобразований изображений ФЦО вызвана требованиями снижения вычислительной сложности и обеспечения работоспособности алгоритма в РМВ. Оптимизация функционала преобразования $Q\{\ldots\}$ позволяет существенно повысить скорость определения ВСФ $\Delta\vec{r}_{k-1,k}$ без снижения точности его вычислений по сравнению с классическими разностными и корреляционными алгоритмами [6, 7].

Качество определения ВСФ может быть оценено степенью подавления фоновой компоненты ФЦО, которая определяется двумя критериальными функциями:

1 Степень подавления энергии фона

$$J_E^k = E_{PИ}^k \Big/ E_{ФЦО}^k, \tag{4}$$

где $E_{ФЦО}^k = \int\limits_{S_K} B^k(\vec{r},t_k)dS_K$, $E_{PИ}^k = \int\limits_{S_K} B_P^k(\vec{r},t_k)dS_K$ – интегральная по кадру энергия ФЦО и РИ изображения; S_K - площадь кадра изображения;

2 Остаточная площадь фоновой компоненты

$$S_E^k = \int\limits_{S_K} H\left[B_P^k(\vec{r},t_k);0\right]dS_K \Big/ \int\limits_{S_K} H\left[B^k(\vec{r},t_k);0\right]dS_K, \tag{5}$$

где $H[x;h] = \begin{cases} 1, x \ge h \\ 0 \, иначе \end{cases}$;

В [7] предложен метод определения смещения изображений на основе метода опорных точек, в котором в качестве последних выбраны точки в областях максимального изменения яркости, для чего вычисляются лапласианы изображений ФЦО.

Предложенный алгоритм использует развитие данного метода.

1. Для каждого изображения ФЦО формируется поле лапласианов $LB_k(\vec{r},t_k) = \Delta B_k(\vec{r}_{ij}, t_k)$ путем цифровой свертки изображения с матрицей лапласиана.

2. Формируется матрица лапласианов посредством ранжирования поля лапласианов по амплитуде

$$L_k = \{(\left|LB_k(\vec{r}_n,t_k)\right|,\vec{r}_n)^T\} = \{(A_{k,n},\vec{r}_n)^T\},\ n = 1\ldots N_{fr}. \tag{6}$$

где $A_{k,n} = \left|LB_k(\vec{r}_n,t_k)\right|$ – амплитуда лапласиана, $\left|LB_k(\vec{r}_{n+1},t_k)\right| \le \left|LB_k(\vec{r}_n,t_k)\right|$, N_{fr} – размер кадра изображения ФЦО.

3. По матрице лапласианов определяется интегральный закон распределения амплитуды лапласиана $P_A(A_{k,n})$ для *k*- ого изображения ФЦО.

4. Оценивается степень сложности фоновой компоненты изображения ФЦО. Она оценивается по поведению функции $P_A(A_{k,n})$ в области больших значений n. Для этого формируется значение критерия $H_I = \underset{A}{arg}(P_A(A_{k,n}) = q) \Big/ \sigma_B$, где σ_B - СКО интенсивности текущего изображения ФЦО, $q = 0{,}93\ldots0{,}95$. Значение H_I сравнивается с порогом

$$h_I = (1{,}5\ldots2)\cdot\left[\Phi^{-1}(q/\sigma_B) + 0{,}5\right], \tag{7}$$

где $\Phi^{-1}(x)$ - обратная функция Лапласа. При выполнении условия $H_I > h_I$ выполняется условие сложного неоднородного фона. Данное условие

проверяется как для первого изображения ФЦО, так и для последующих изображений ФЦО, что вызвано возможностью смены характера ФЦО (изменение степени облачности и т.д.).

Количество опорных точек (используемых лапласианов) варьируется в пределах от 100 до 1000 (для изображений ФЦО с количеством элементов разложения порядка $(3 \dots 5)\cdot 10^5$. Для оценки ВСФ по смещению матрицы лапласианов используется разностный алгоритм сравнения последовательных изображений, аналогично используемому в [7].

Проверка предложенного алгоритма проводилась в условиях динамичной ФЦО при неподвижной ОЭС. Нестационарность фоновой компоненты определялась временными изменениями фоновой компоненты изображения (изменения геометрии облачного поля, его яркости и его смещением), что приводит к появлению остаточной фоновой компоненты в разностном изображении. В качестве динамических объектов использовались трассовые самолеты. На рисунке 1 приведены зависимости степени подавления фоновой компоненты для 2-х последовательностей изображений ФЦО при неподвижной ОЭС при наблюдении объекта на фоне ясного неба и наличии в поле зрения ОЭС облаков $\chi = 0{,}82 \dots 0{,}93$.

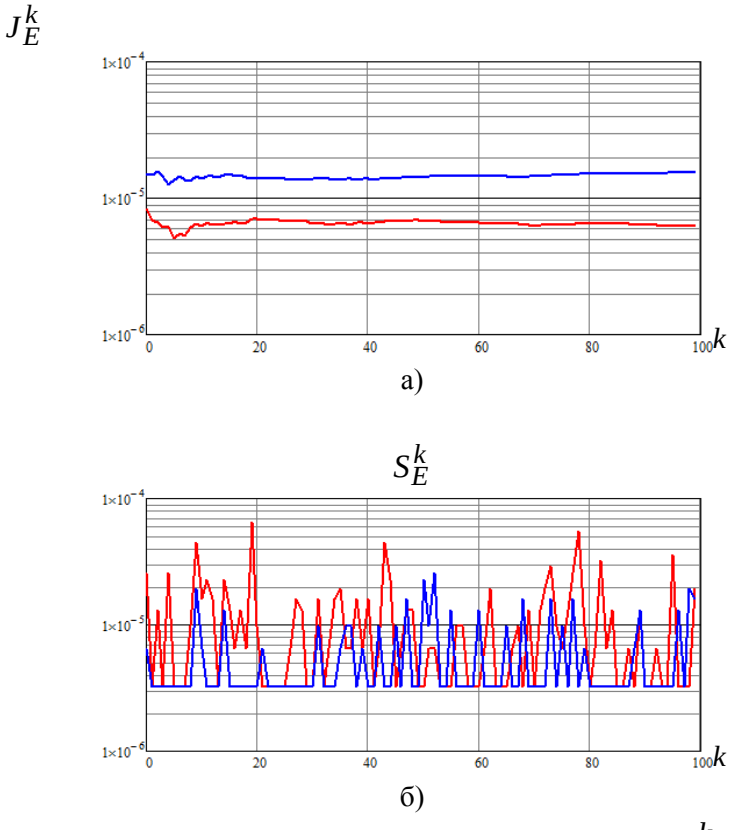


Рисунок 1 – Степень подавления фоновой компоненты (а - J_E^k ; б - S_E^k) для 2-х последовательностей изображений ФЦО

Данные зависимости показывают, что в среднем по реализациям степень пространственного подавления фоновой компоненты превышает 10^5.

На рисунке 2 приведены зависимости степени подавления фоновой компоненты для 2-х последовательностей изображений ФЦО при неподвижной ОЭС при наблюдении объекта на границе облачности (последовательность 1) и на фоне облачности (последовательности 2-4) $\chi = 0{,}85\ldots0{,}92$.

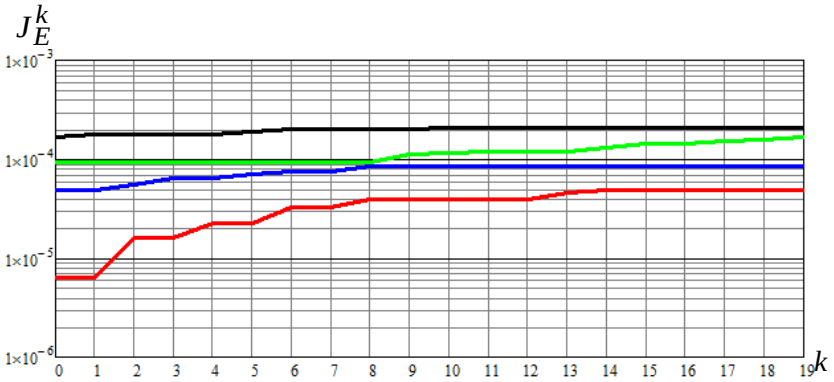


Рисунок 2 – Степень подавления фоновой компоненты для 4-х последовательностей изображений ФЦО при наблюдении объекта на фоне облачности (нумерация последовательностей снизу вверх)

Данные зависимости показывают, что в среднем по реализациям степень пространственного подавления фоновой компоненты составляет $5{\cdot}10^3$ ….$3{\cdot}10^4$. Снижение степени подавления фона объясняется меньшим контрастом объекта и фона. Представляет интерес оценка изменения отношения сигнал/фон χ для разностных изображений (рисунок 3).

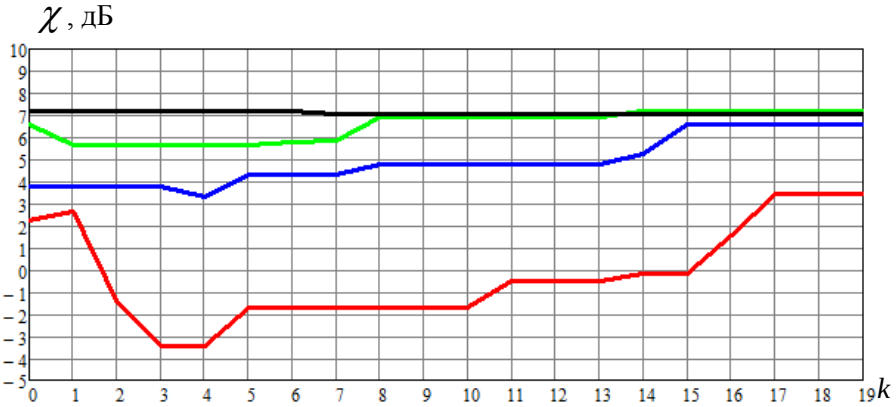


Рисунок 3 – Отношение сигнал/фон для 4-х последовательностей изображений ФЦО при наблюдении объекта на фоне облачности (нумерация последовательностей снизу вверх)

Из данных зависимостей видно, что для наблюдения ДО на фоне облачности отношение сигнал/фон превышает 4дБ, что позволяет использовать для выделения изображений ДО пороговые алгоритмы. Знакопеременный характер зависимости для наблюдения ДО на границе облачности связан с снижением

контраста изображения ДО и фона и, вследствие этого, уменьшением амплитуды ДО в РИ по сравнению с фоновой компонентой.

На рисунке 4 приведены суммарные изображения для накопления 5 и 10 РИ для 5 проанализированных последовательностей (1 на фоне ясного неба и 4 на фоне облачности). Под фрагментами изображений приведены отношения минимального и максимального размеров суммарного изображения, представляющего траекторию движения ДО.

Из сравнения рисунков 4 видно, что на всех интервалах накопления изображения ДО оно выделяется на фоне односвязной областью, обеспечивая формирование траектории ДО и обладает ярко выраженной анизотропией свойств, что позволяет обнаруживать ДО на изменяющемся фоне и выделять их изображения в случае сложного пространственно неоднородного фона.

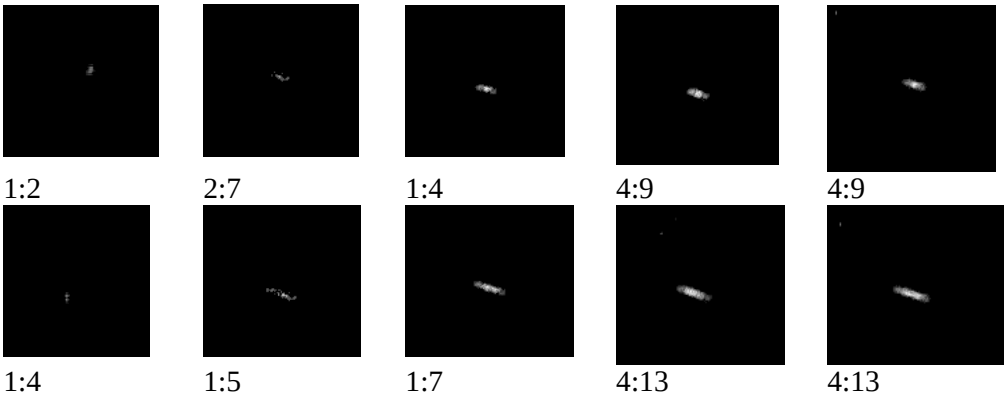


Рисунок 4 – Фрагменты суммарных изображений для интервала накопления 5 (верхний ряд) и 10 (нижний ряд) РИ

На суммарном изображении остаточному фону соответствуют области с малой (до 2) связностью, имеющие максимальный размер не более 3…5 элементов, для фильтрации которых может быть успешно применена размерная фильтрация и фильтрация по связности [8,9]. При этом интервал суммирования РИ не превышает 5 … 10 РИ.

Предложенный алгоритм обнаружения динамических объектов обеспечивает решение задачи обнаружения ДО, наблюдаемого на нестационарном неоднородном фоне, и может быть использован в ОЭС обнаружения динамических объектов.

Список литературы

1. *Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.*
2. *Кочкин В. А. Автоматическое выделение динамических объектов на фоне подстилающей поверхности Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон.журн. 2014. № 12. С. 889–901.*

3. *Стротов В.В. Оценивание параметров смещения изображения в задачах выделения движущихся объектов // Вестник РГРТУ. Вып 23. – Рязань, 2008. – С. 30 – 37.*
4. *4 .Кочкин В.А. Автоматическое обнаружение динамических объектов на сложном неоднородном фоне // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Сер. Технические науки. Информационные технологии. 2014. № 3 (19). С. 45-53.*
5. *5. Кочкин В.А. Автоматическое обнаружение динамических объектов на сложном неоднородном фоне // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Сер. Технические науки. Информационные технологии. 2014. № 3 (19). С. 45-53.*
6. *6. Буряченко В. В. Стабилизация видео для статичной сцены на базе модифицированного метода соответствия блоков // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та: сб. науч.тр. Вып. 3 (43). Красноярск, 2012. С. 10–15.*
7. *Кочкин В.А., Лоскутов В.Ю. Выделение динамических объектов при компенсации смещения фона в последовательности неоднородных динамических изображений // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Сер. Технические науки. Информационные технологии. 2016. № 6 (34). С. 61-72.*
8. *Сальников И.И. Размерная селекция бинарных изображений локальных объектов при анализе аэрофотоснимков. Журнал «Телекоммуникации». М.: Изд-во Наука и Технологии. №2. – 2015. – С.17-23.*
9. *Сальников И.И. Поэлементный анализ растровых изображений. Монография. Пенза: Приволжский дом знаний, 2015 г., 176 с.*
10. *Сальников И.И. Методы и алгоритмы сегментации бинарных изображений на основе построчного анализа. Научно-методический журнал «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс». – Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. ун-та, 2014. – №03(19). С.29-40.*

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

УДК 519.216
ББК 22

ВЫБОР АЛЬТЕРНАТИВ С ПОМОЩЬЮ ПРОИЗВОДЯЩЕЙ ФУНКЦИИ

© ***Т.А. Шорникова***, *Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

CHOICE OF ALTERNATIVES BY MEANS OF THE GENERATING FUNCTION

© ***T.A. Shornikova***, *Penza State Technological University (Penza, Russia)*

В статье рассматривается построение стохастических моделей с использованием случайных процессов на основе выбора с помощью производящей функции различных альтернатив.

Ключевые слова: вероятности перехода, общий ожидаемый доход, производящая функция, оценка альтернатив.

In the article the construction of stochastic models is examined with the use of casual processes on the basis of choice by means of productive function of different alternatives.

Key words: probabilities of transition, the total expected income, generating function, estimation of alternatives.

E-mail: shornikovat@mail.ru.

Рассмотрим следующую задачу – расчет асимптотической величины среднего дохода, используя системы уравнений для вероятностей перехода из одного состояния в другое. Для этого построим стохастическую модель с использованием случайных процессов на основе выбора с помощью производящей функции различных альтернатив [1].

При последовательном анализе альтернатив обнаруживается, что оптимальное поведение на $(n+1)$–м шаге, если n–й шаг был оптимальным. Это можно выразить формулой:

$$v_i(n+1) = \max_k \sum_{j=1}^{N} p_{ij}^k \left[r_{ij}^k + v_j(n)\right], n = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где величины $v_i(n+1)$ или $v_j(n)$ показывают общий ожидаемый доход для выбранного оптимального поведения (оптимального правила) [2]. Эту формулу можно представить в виде:

$$v_i(n+1) = \max_k [q_i{}^k + \sum_j^N p_{ij}{}^k v_j(n). \quad (2)$$

При ее расчете определяется как вектор выбранного решения $\boldsymbol{d}(n)$, так и общий ожидаемый доход для оптимальной траектории. Последовательное вычис-

ление ожидаемого дохода заканчивается определением вектора решений, который в дальнейшем не изменяется и ведет к наибольшему ожидаемому доходу.

Недостатком рассмотренного подхода является то, что при определенном количестве стадий нет точного критерия для определения того, достигнуто ли оптимальное решение. Всё вышесказанное показывает направления поиска для решения вопроса выбора оптимальной альтернативы – на основе асимптотических значений общего ожидаемого дохода. При применении такого критерия необходимо, чтобы процесс продолжался достаточно долго. Поскольку регулярный процесс устанавливается довольно быстро, решение зависит от асимптотических свойств, приемлемых с практической точки зрения [3].

Если процесс продолжается достаточно долго, то можно для определения общего ожидаемого дохода применить некоторые системы уравнения. Вместо нахождения величин $v_i(n)$ путем последовательной оценки альтернатив на каждом шаге можно сформулировать асимптотическую формулу для $v_i(n)$ и с помощью вычисленных на ее основе величин рассматривать альтернативы [4].

Рассмотрим предложенный подход для дискретных изменений с постоянной оценкой состояний. Другие случаи потребуют лишь незначительных модификаций [5].

Сформулируем сначала асимптотическое соотношение между $v_i(n)$ и $v_i(n-1)$. Поскольку

$$v_i(n) = q_i + \sum_j^N p_{ij}\,[(n-1)] \tag{3}$$

и далее

$$v_i(n) = ng + v_i\,, \tag{4}$$

то можно записать:

$$ng + v_i = q_i + \sum_j^N p_{ij}\left[(n-1)g + v_j\right], \tag{5}$$

что после преобразования $\left(\sum_j^N p_{ij} = 1\right)$ даст:

$$g + v_i = q_i + \sum_j^N p_{ij} v_i. \tag{6}$$

Получили N уравнений для $N+1$ неизвестных $g, v_1 \ldots, v_N$.

Для принятия решения достаточно знать соотношения между v_i, т.е. относительные значения общего ожидаемого дохода [4]. Эти соотношения можно определить просто, потребовав лишь постоянства значений разности $v_i - v_r$. Тогда система уравнений расширяется за счет уравнения $v_N = 0$. Вычисленные v_i будут отличаться от исходных на одну и ту же постоянную величину. Это означает, что разница между ними будет такая же, как и между исходными v_i. Поскольку при выборе альтернатив речь идет о различии их оценок, то можно воспользоваться этими «относительными» v_i. Разницу $v_1 - v_2$ можно интерпретировать, например, как разницу между ожидаемым доходом процесса, вышедшим из состояний 1 и 2.

Если уравнение

$$g + v_i = q_i + \sum_j^N p_{ij} v_j \tag{7}$$

умножить на вероятности состояний после достижения равновесия (π_i) и сложить, то получим:

$$g\sum_i^N \pi_i + \sum_i^N \pi_i v_i = \sum_i^N \pi_i q_i + \sum_i^N \cdot \sum_j^N p_{ij}\pi_i v_j. \quad (8)$$

А так как $\sum \pi_i p_{ij} = \pi_j$, то для g получим:

$$g = \sum_i^N \pi_i q_i. \quad (9)$$

Это тоже соотношение, что и полученное при изучении асимптотических величин оцениваемого процесса. Хотя g можно определить и иначе, не прибегая к системе уравнений для относительных величин v_i, мы не получили бы в этом случае формулу для выбора альтернатив с помощью асимптотических величин и должны были бы снова обратится к оценке отдельных стадий [6].

Определив $g, v_i \ldots n_N$, выразим относительные асимптотические величины $v_i\ (n)$.

Перейдем ко второму шагу решения поставленных задач. С помощью величин $g, v_i \ldots v_N$ можно более просто и однозначно выбирать оптимальную альтернативу. Критерием выбора альтернативы была формула

$$q_i{}^k + \sum_j^N p_{ij}^k v_j(n). \quad (10)$$

При достаточно большом n ее можно заменить формулой

$$q_i^k + \sum_j^N p_{ij}^k (ng + v_j). \quad (11)$$

Поскольку максимум этой величины отыскивается для некоторой из k возможных альтернатив, то можно не учитывать не зависящую от k константу $ng\sum p_{ij}^k$. Та же альтернатива k максимизирует это выражение как с константой, так и без нее [7]. По этой же причине для определения оптимума достаточно рассмотреть относительные величины v_i, отличающиеся на некоторую постоянную от абсолютных величин v_i.

Таким образом, выбор альтернатив осуществляется на основе формулы

$$q_i{}^k + \sum_j^N p_{ij}^k v_j. \quad (12)$$

Весь процесс решения можно резюмировать следующим образом [8]:

1) с помощью величин p_{ij}, q_i по формуле

$$g + v_i = q_i + \sum_j^N p_{ij} v_j \quad (13)$$

определяются величины v_i, g $(v_N = 0)$;

2) для каждого состояния отыскивается альтернатива, максимизирующая

$$q_i^k + \sum_j^N p_{ij}^k v_j, \quad (14)$$

где v_j было определено в п.1;

3) найденная альтернатива даст величины $q_i^{k`}, p_{ij}^{k`}$ для повторения шага 1 или 2.

Список литературы

1. *Шорникова Т.А. Распределение выбросов по длительности и его оценка на основе прогнозирования случайных процессов. // Журнал «Обозрение прикладной и промышленной математики». 2005. Т.12. №2. С. 568-569.*
2. *Shornikova T.A., Alenina A.V. Stochastic approach to the study of economic events // European researcher. – Series A. – 2013. – № 5-1(48). – C. 1259-1263.*
3. *Шорникова Т.А. Диффузионные марковские преобразования внутри многогранного угла (q+r)-мерного пространства. // Журнал «Обозрение прикладной и промышленной математики». 2005. Т.12. №2. С. 567-568.*
4. *Шорникова Т.А. Расчет дохода при стохастическом моделировании // Журнал «Обозрение прикладной и промышленной математики». 2009. Т. 16. №5. С. 951-952.*
5. *Шорникова Т.А. Стохастическое моделирование процессов с помощью производящей функции // Журнал «Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе». 2016. №3 (19). С. 88-98.*
6. *Shornikova T.A., Glebcheva I.O., Halitova G.I. Modelling of the process of controlling technical systems with the help of diffusion Markov random processes. // European researcher. Series A. 2011. №5-1(7). C. 643-644.*
7. *Шорникова Т.А. Стохастическое моделирование экономических процессов. // Сборник статей XXIII Международной научно-технической конференции «Математические методы и информационные технологии в экономике, социологии и образовании». Под редакцией В.И. Левина. 2009. С. 15-17.*
8. *Шорникова Т.А. Стохастический подход при расчёте дохода. // Сборник статей III Международной научно-технической конференции молодых специалистов, аспирантов и студентов «Математическое и компьютерное моделирование естественнонаучных и социальных проблем». Под редакцией И.В. Бойкова. 2009. С. 70-71.*

УДК 004.94
ББК 30

НЕРЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОАГЕНТНЫМИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

© ***М.Ю. Бабич***, *АО «НПП «Рубин» (г. Пенза, Россия)*

UNSOLVABLE PROBLEMS OF MULTIAGENT TECHNICAL-ORGANIZATIONAL SYSTEMS MANAGEMENT INTELLECTUAL SUPPORT

© ***M.Yu. Babich,*** *JSC "NPP "Rubin" (Penza, Russia)*

В статье рассматриваются вопросы интеллектуализации деятельности должностных лиц, принимающих решение. Анализируются условия, при которых решения некоторых задач являются неадекватными. Определяется класс систем, где наличие рассматриваемых задач может быть наиболее вероятным.

Ключевые слова: система, многоагентная система, интеллектуальный агент, горизонт прогноза, образное мышление.

The paper discusses the intellectualization of official activities responsible for making decisions. The conditions under which the solutions of some problems are inadequate are analyzed. A class of systems in which the considered problems presence can be most probable is defined.

Key words: system, multiagent system, intellectual agent, forecasting horizon, image thinking.

Опишем класс многоагентных организационно-технических систем, для которых будем рассматривать вопросы интеллектуальной поддержки управления. Обозначим через S многоагентную организационно-техническую систему, через C – внешнюю среду, в которой она функционирует, через A – множество агентов a, $A = \{a\}$.

Агентами системы S являются лица (или группа лиц), управляющие техническими устройствами. Агенты системы S подчинены подсистеме управления (ПУ), то есть объектами управления ПУ являются люди и/или техника, управляемая людьми, способная к передвижению. В систему S могут входить аналогичные подсистемы, также подчиненные ПУ и имеющие свои ПУ. Вычислительные средства ПУ, автоматизируя обработку поступающих входных данных, информируют должностных лиц (ДЛ) о состоянии объектов управления, выдают рекомендации по их управлению, но не оказывают непосредственного управляющего воздействия на объекты управления. Управляющие воздействия ПУ осуществляется через команды ДЛ, точнее, через команды лиц, принимающих решение (ЛПР). Наблюдается мягкое управление людскими и техническими ресурсами в том смысле, что при четко поставленных целях и условиях их достижения жестко не регламентируются пути достижения. Определение путей достижения целей возлагается на агентов, то есть на ДЛ, подчиненных ПУ. Людские и технические ресурсы системы S территориально распределены по некоторому региону.

Входную информацию каждая ПУ воспринимает через средства наблюдения (СН). В их число входят сейсмические датчики, устройства визуального наблюдения, средства навигации, ДЛ и др. Важным свойством систем рассматриваемого класса является возможное наличие противоречивой, неточной, нечеткой информации, поступающей от различных и независимых СН.

Могут существовать два типа объектов, на которые ПУ оказывает управляющее воздействие. Первый тип: объекты, управление которыми происходит непосредственно через команды из ПУ. Второй тип: объекты, которыми ПУ не может управлять непосредственно через решения ЛПР, но на их действия могут влиять действия объектов первого типа, например, объекты городского транспорта и пассажиры, спасатели и терпящие бедствия, силы охраны и нарушители границ. Действия объектов управления подчиняются некоторым обобщенным правилам поведения и командам ЛПР, но не носят детерминированного характера. Накопленная статистика, определяющая состояния или действия объектов, может отсутствовать. Заметим, что агенты второго типа могут управляться своей системой S' через другую ПУ и менять свое состояние не только с учетом действия агентов первого типа, но и в зависимости от команд своей ПУ, которые могут быть не известны.

Функционирование подобных систем требует обработки в ПУ большого объема информации, являющейся, зачастую, противоречивой и неточной. Растущая сложность отслеживаемых процессов, протекающих в предметной области систем рассматриваемого класса, растущий объем обрабатываемой информации, увеличение степени критичности принимаемых решений в процессе функционирования многоагентных систем требуют организации решений задач интеллектуальной поддержки управления.

В [1] были приведены причины, затрудняющие внедрение экспертных технологий, обусловленные характерными свойствами организационно-технических систем рассматриваемого класса. По существу, приведенные причины затрудняют применение также других средств интеллектуальной поддержки работы ЛПР. К ним относятся:

- окончательное решение в ПУ, принимает ДЛ, являющееся ЛПР (ошибка в принятии решения чревата серьезными последствиями);
- время принятия решения, является близким к реальному времени (последствия наступают достаточно быстро);
- отсутствует накопленная информация, необходимая для создания базы данных (БД) и базы знаний системы;
- отсутствует прозрачность предлагаемых решений (ЛПР неясно, каким образом получилось предлагаемое решение, почему необходимо принять к исполнению именно то решение, которое выдает программное обеспечение (ПО));
- существуют неоправданные надежды разработчиков на формализацию процесса решения, а также сложность формализации имеющихся знаний;
- отсутствует необходимое количество специалистов для задач, требующих решения.

Однако приведенные причины сложности внедрения решений задач интеллектуальной поддержки кажутся, на первый взгляд, временными. Складывается впечатление, что дальнейшее развитие научно-технических исследований, усовершенствование алгоритмов, улучшение характеристик средств вычислительной техники будут способствовать более широкому внедрению задач интеллектуальной поддержки управления многоагентных систем рассмотренного класса.

Для определения возможностей интеллектуализации систем уточним, для каких задач необходимы средства интеллектуальной поддержки.

Под задачами интеллектуализации будем понимать:

1) задачу выбора ЛПР решения, удовлетворяющего заданным критериям, являющегося приемлемым с его точки зрения или для суперсистемы, которой принадлежит система *S*;

2) задачу определения состояния системы *S* и среды *C* после управляющего воздействия, соответствующего некоторому решению ЛПР, или без него;

3) задачу определения состояния системы *S* после определенного воздействия на нее среды *C* или состояния среды *C* после воздействия системы *S*;

4) задачу определения на основе данных и знаний у ЛПР новых неизвестных характеристик системы *S*, среды *C* либо новых знаний.

Необходимыми условиями решения задач 1 – 4 являются:

- ЛПР невозможно получить решение задач без средств интеллектуальной поддержки;
- время решения задач должно быть меньше времени прогноза и времени принятия решений без средств интеллектуальной поддержки;
- точность решения задач, полученных без средств интеллектуальной поддержки, не удовлетворяет ЛПР или суперсистему, которой принадлежит система *S*.

Невыполнение приведенных условий делают задачи интеллектуальной поддержки управления многоагентных систем рассматриваемого класса нерешаемыми.

Рассмотрим, в каких случаях приведенные условия не выполняются.

1. Под реальной информацией будем понимать информацию о состоянии системы – $S(t)$, о состоянии внешней среды системы – $C(t)$, а также о состоянии множества агентов первого и второго типов – $A(t)$ в некоторый момент времени t. Реальная информация является объективной и не зависит от таких факторов, как неточность передачи данных, ошибки в ПО и в алгоритмах обработки информации, ошибки, вызванные неточностью СН, неадекватность используемой БД, преднамеренное искажение данных агентами второго типа и т.д.

Под виртуальной информацией будем понимать информацию, в поле которой работают ЛПР в ПУ. В виртуальной информации все приведенные факторы возможного ее искажения могут присутствовать. Виртуальная информация создается на основе полученных данных от СН. В ПУ ее обрабатывают средства вычислительной техники и ПО. ЛПР вынуждены принимать решения на основе виртуальной информации, хранящейся в БД системы и обрабатываемой ПО.

Виртуальная информация создает некоторую модель состояния системы $S(t)$, внешней среды $C(t)$ и множества агентов $A(t)$. Как для всякой модели встает вопрос об ее адекватности. Ответ на вопрос об адекватности модели может существовать только в том случае, если реальная информация о состоянии системы, внешней среды и множеств агентов периодически повторяется, то есть существует некоторый период времени $[\tau_1, \tau_2]$, для которого выполняется:

$$\forall\, t' > \tau_2,\ \exists\, t \in [\tau_1, \tau_2], \text{ что } \rho(S(t), S(t')) < \varepsilon,\ \rho(C(t), C(t')) < \varepsilon,\ \rho(A(t), A(t')) < \varepsilon, \quad (1)$$

где ρ – мера близости.

В (1) ε означает, что отличия между рассматриваемыми состояниями для решаемых задач является несущественными.

Если соотношение (1) не выполняется, то есть повторяемость событий в рассматриваемых системах является незначительной, то вопрос об адекватности модели остается открытой и, следовательно, нет уверенности в степени точно-

сти решения задач, используемых в среде виртуальной информации, даже если она является предельно точной.

Кроме того, в настоящее время идет активное исследование открытых, нелинейных систем [2]. Результаты исследований можно перенести на системы рассматриваемого класса. Траектории состояний рассматриваемых систем, зависят от принимаемых решений ЛПР и могут быть различными для каждого случая, тем не менее, они притягиваются целью, которая поставлена перед ПУ системой. При определенных условиях рассматриваемые системы достаточно часто могут входить в область, где предсказать поведение систем можно лишь для ограниченного периода (горизонт прогноза). Со временем нарастают незначительные неточности в определении начального состояния систем, и с некоторого времени теряется возможность какого-либо прогнозирования, так как система начинает вести себя хаотически. Выбор траектории изменения состояний системы в бифуркационных точках, то есть в точках ветвления возможных путей изменения состояний системы и среды, зависит от непредсказуемых значений большого количества параметров, условий, что делает невозможным прогнозирование будущего состояния с помощью используемых моделей.

2. ЛПР в ПУ находится в виртуальном информационном пространстве. ЛПР может либо самостоятельно принять решение на основе полученной информации, либо получить обработанную информацию ПО, которое реализует какой-либо алгоритм решения задач интеллектуальной поддержки. В последнем случае мы будем находиться в рамках логики компьютера. Здесь предполагается, что нет существенных ошибок в ПО, в реализуемых алгоритмах, и входная виртуальная информация предельно точно отражает реальную информацию.

Если ЛПР находится в рамках логики компьютера, то оно может получить решение только того, что каким-то образом формализовано.

Важным обстоятельством плохой формализуемости задач является относительно небольшое количество агентов, находящихся в контуре многоагентной системы *S*, что делает их поведение плохо предсказуемым. Например, в час пик движение толпы на станции метро можно описать уравнениями движения жидкости. Сложность возникает в поздние вечерние часы, когда необходимо описать движение всего нескольких пассажиров.

К задачам с плохой формализацией относятся слабоструктурированные задачи, которые содержат как количественные, так и качественные переменные, причем качественные аспекты задач имеют тенденцию к доминированию [3]. Как правило, для решения подобных задач используются знания, опыт и оценки человека, то есть ДЛ (не обязательно являющиеся ЛПР) становятся обязательными и непосредственными участниками процесса решения подобных задач. Тем не менее, даже решение слабоструктурированных задач некоторым образом формализовано.

Заметим, что в настоящее время многие исследователя в своих работах доказывают, что логика работы компьютера принципиально отличается от мышления человека [4–6]. Известны интеллектуальные процессы, которые не поддаются компьютерному моделированию. Кроме того, многие интеллектуальные задачи человек решает быстрее компьютера, несмотря на то что скорость передачи сигналов мозга значительно меньше. Наиболее характерны два круга задач, решение которых занимает особое место среди когнитивных процессов:

- быстрое распознавание человеком не только отдельных объектов, но и сложных ситуаций;

– умение человека быстро рассуждать, получая логически верные следствия, при отсутствии корректного доказательства [7], что дает ему возможность хорошо ориентироваться в плохо формализуемых ситуациях.

До внедрения средств вычислительной техники принимать решения приходилось всегда. Информация о возможностях и текущем состоянии системы, о задачах, поставленных перед системой, о необходимых ресурсах и т.д. всегда находилась у ЛПР в виде ментальных образов. Здесь под ментальным образом понимается не только визуальный образ, но и образ в широком понимании. Если решение задач интеллектуальной поддержки относится к описанным выше процессам, то ЛПР на основе своего опыта и интуиции значительно быстрее получает необходимое решение, либо его решение значительно точнее решения компьютера.

3. Существенным фактором, усложняющим моделирование и управление систем рассмотренного класса, является то, что как ЛПР, так и ДЛ, относящиеся к объектам управления, являются интеллектуальными агентами в сильном смысле, хотя агенты в процессе моделирования рассматриваются в качестве интеллектуальных агентов в слабом смысле. Такое допущение упрощает задачу моделирования функционирования многоагентных систем S, но приводит к существенным неточностям.

Одним из свойств интеллектуальных агентов в сильном смысле, влияющим в некоторых случаях на функционирование системы S, является следующее: любое живой организм всегда принадлежит не одной, а нескольким системам с полностью не совпадающими целями функционирования, возможность его перехода из одной системы в другую определяется его состоянием, состоянием внешней среды и состоянием систем, которым он принадлежит.

Необходимо уточнить, что значит принадлежность человека или, в нашем случае, агента некоторой системе. Будем считать, что агент принадлежит системе S, если агент, взаимодействуя с другими элементами или подсистемами, входящими в систему S, должен функционировать в плане достижения цели системы S под управлением ПУ.

Таким образом, выполняется следующая аксиома [8]:

$$\forall a \in A, \exists S_1, S_2, \text{ что } (a \in S_1) \wedge (a \in S_2) \wedge (S_1 \neq S_2) \wedge (P_{S1} \neq P_{S2}). \qquad (2)$$

В (2) P_{S1} и P_{S2} обозначают цели систем S_1 и S_2, то есть любой агент принадлежит не только одной системе, но и некоторой другой системе, причем цели систем не совпадают.

Уточним аксиому (2). Имеется в виду, что агент принадлежит двум разным системам, одна из которых не является подсистемой другой. То есть $\forall a \in A, \exists S_1, S_2$, такие, что $(a \in S_1) \wedge (a \in S_2) \wedge (S_1 \neq S_2) \wedge (S_1 \not\subset S_2) \wedge (S_2 \not\subset S_1)$.

Например, агент a может одновременно принадлежать системам «Предприятие» и «Заочная аспирантура». При планировании работы предприятия, выполняющего выпуск продукции по графику, согласованному с Заказчиком, не учитываются планы аспирантуры и наоборот. Аспирантура и предприятие учитывают только свои цели. В результате при совпадении времени защиты диссертации, сдачи экзаменов и завершения очередного этапа выпуска продукции либо срываются планы учебы и выпуска аспирантов, либо предприятие должно лихорадочно корректировать работу коллектива.

Цели системы и агента могут быть составными, то есть

$$P = P^1 \oplus P^2 \oplus \ldots \oplus P^n, \qquad (3)$$

где знак «⊕» обозначает конъюнкцию или дизъюнкцию. В частности, части составной цели P^i могут быть противоречивы, то есть при достижении одной из двух противоречивых целей, вторую достичь невозможно, например, цель самосохранения, как для всякого живого существа, и желание ощущения риска или требование осуществлять рискованные действия, например, в силовых системах. Обладая способностью организовывать необходимые ему системы, вступать в уже существующие, переходить из одной системы в другую, агент (человек) стремится найти системы, части целей которых совпадают с его частями цели.

Не всегда, но при соблюдении определенных условий, возникает скрытое взаимодействие систем. Под скрытым взаимодействием понимается взаимодействие, которое осуществляется без управления ПУ. ПУ систем не знают о скрытом взаимодействии или не могут на него повлиять (в действительности, влияние возможно, но только опосредованное [9]). При таком взаимовлиянии меняется алгоритм функционирования рассматриваемых систем [10]. Если условия, при которых осуществляется скрытое взаимодействие, выполняются, то игнорирование взаимодействия может привести к ошибкам в прогнозировании состояния систем и агентов после принятия ЛПР решений, оказывающих управляющее воздействие.

В нашем случае, если ЛПР есть агент a, то $(a \in S_1) \wedge (a \in S_2)$, где S_1 – виртуальная система, которая функционирует в поле виртуальной информации, S_2 – реальная система. Реальная система принадлежит суперсистеме, которая требует, чтобы работа ДЛ и ЛПР были эффективны в реальных ситуациях. Суперсистеме безразлично, ЛПР принимает решения на основе решения задач интеллектуальной поддержки или нет. Виртуальная система живет в мире виртуальной информации. Цели, которые пытается достичь ЛПР a, ставятся на основе информации, поступившей от СН и обработанной средствами вычислительной техники, учитывая решения задач интеллектуальной поддержки. Таким образом, цели P_{S1}, P_{S2} в общем случае не совпадают.

Таким образом, наличие «нерешаемых задач» интеллектуальной поддержки управления обуславливается:

- слабой повторяемостью моделируемых событий, что приводит к отсутствию необходимой статистики;
- существованием областей состояния систем с малым горизонтом прогноза;
- отличием логики работы средств вычислительной техники от мышления человека, ЛПР в ПУ системы;
- возможным наличием условий, при которых возникают скрытые взаимодействия систем, которым принадлежат интеллектуальные агенты систем.

Для решения «нерешаемых задач» необходимо искать другие подходы. Одним из таких подходов является реализация метода прецедентов [11]. Метод прецедентов не выдает готовых решений, но ориентирует ЛПР в ранее принятых решениях для аналогичных ситуаций. Под прецедентом будем понимать запись в БД ПУ, содержащую значения параметров состояния системы, среды и агентов. Вместе с прецедентами в БД хранятся значения параметров принятых решений и их результатов. Метод прецедентов позволяет найти в БД прошлое удачное решение для обстановки, близкой к возникшей, но его применение оправдано только в случае, когда возникающие задачи имеют тенденцию к повторению, и подобные задачи имеют подобные решения. Мы же предполагаем

низкую повторяемость событий. Однако объем хранящейся в БД информации о прецедентах, являющийся существенным для рассматриваемого метода, можно пополнять известными методами сценирования и методами ролевых игр.

Сценирование предполагает создание сценариев и на их основе развитие заданных ситуаций. Сценарии базируются на анализе будущих возможностей и альтернативных траекторий развития. В процессе ролевой игры игроки в рамках заданных правил, руководствуясь характером своей роли и внутренней логикой действий, моделируют ту или иную ситуацию, определяют направление и исход игры. В ролевой игре можно придерживаться ранее подготовленных сценариев, а возникающие ситуации в процессе ролевой игры сами становятся сценариями, которые можно анализировать после ее завершения. Таким образом, метод сценирования и метод ролевой игры связаны между собой, поэтому их можно рассматривать как один метод – метод сценирования и ролевой игры (МСИ).

В отличие от обычного метода прецедентов, метод прецедентов совместно с МСИ, реализованным в электронном виде, может не выдавать готового решения, близкого к «правильному» решению для текущей ситуации, а *стимулировать мыслительную деятельность* ЛПР. Как и в приведенном выше втором случае невыполнения условий решения задач 1 – 4, когда решение задач интеллектуальной поддержки медленнее и менее эффективно решения человека, вопросы управления остаются за ЛПР с учетом его опыта и интуиции, однако в этом случае мыслительная деятельность ЛПР стимулируется выдачей прошлых решений, их анализом, а также имитацией возможных ситуаций при реализации МСИ. Кроме того, наличие рассматриваемого МСИ позволит накапливать необходимую информацию в БД в процессе имитационных игр, тренировок, анализа предполагаемых ситуаций, то есть в процессе плановых работ ПУ, но не в редко возникающих реальных ситуациях.

Примером имитационной модели, реализующей МСИ, является разработанная модель обнаружения нарушителей границы охраняемой области [12].

Список литературы

1. *Бабич М.Ю. Решение задач системы поддержки принятия решений в процессе управления распределенными, динамическими ресурсами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. –Т. 12, № 4. – С. 12–18.*
2. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Основания синергетики. Синергетическое мировоззрение. – М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2014. –256 с.*
3. *Ларичев О.И., Петровский А.Б. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы развития // Итоги науки и техники. – М.: ВИНИТИ, 1987. – Т. 21. – С. 131–164.*
4. *Пинкер С. Язык как инстинкт. – М.: Едиториал УРСС, 2004. –464 с.*
5. *Роуз С. Устройство памяти: от молекул к сознанию. – М.: Мир, 1995. – 384 с.*
6. *Поспелов Д.А. Метафора, образ и символ в познании мира. Новости искусственного интеллекта, 1998. № 1. – С. 4–14.*
7. *Кузнецов О.П. Когнитивная семантика и искусственный интеллект // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 4. – С. 32–42.*
8. *Бабич М.Ю., Бабич А.М. Алгоритмы достижения целей адаптивных агентов в контуре нескольких организационно-технических систем // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Серия: «Технические науки. Информационные технологии». Научно-методический журнал. 2015. Вып. № 3 (25). – С.77–81.*

9. *Бабич М.Ю. Скрытое взаимодействие организационно-технических систем в процессе их функционирования // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: сб. ст. XVI Междунар науч-техн конф. Пенза, 2016. – С. 12–18.*
10. *Бабич М.Ю. Общий алгоритм функционирования систем и агентов в случае выполнения условий аксиом принадлежности // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Серия: «Технические науки. Информатика, вычислительная техника и управление». Научно-методический журнал. 2016. – Вып. № 3 (31). – С. 85–89.*
11. *M.U. Babich, M.M. Butaev and I.I. Salnikov. Information system for management of distributed dynamic resources // International Journal of Applied Engineering Rea19search ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 19 (2016) pp. 9837 – 9841.*
12. *Бабич М.Ю., Ковалева В.С., Нисенбаум Е.Э., Ползунов Н.В., Рыбин С.А. Имитационная модель обнаружения нарушителей границы охраняемой области // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ. 2008. Вып. 5. – С. 112–120.*

СТРУКТУРЫ, МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.317
ББК 34

ПОСТРОЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ АДАПТИВНОГО КООРДИНАТНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

© ***Б.Л. Свистунов***, *Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*
© ***Е.А. Дементьев***, *Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

CONSTRUCTION OF MEASURING CONVERTERS SYSTEMS INFORMATION OF ADAPTIVE COORDINATE-PARAMETRIC MANAGEMENT

© ***B.L. Svistunov***, *Penza State University (Penza, Russia)*
© ***E.A. Dementev***, *Penza State University (Penza, Russia)*

Использование методов построения технических управляемых систем для синтеза структур и алгоритмов средств измерения предполагает создание динамических систем, обладающих свойством адаптации к изменяющимся в процессе измерения условиям эксперимента, требованиям экспериментатора, динамике самого объекта измерения (в широком смысле, исследуемого объекта). В понимании авторов данная адаптивность адекватна обеспечению независимости (по меньшей мере, приемлемо низкой чувствительности) результата измерения (измерительного преобразования) к не подлежащим измерению в данном опыте параметрам исследуемого объекта, а также к факторам среды и канала информационно-измерительных и управляющих систем (помехи, возмущения, паразитные параметры и т.п.).

Ключевые слова: эквивалентная схема, измерительные преобразователи, параметрические датчики, координатно-параметрическое управление.

The use optimization methods of automatic control systems to improve the performance of transducers involves the creation of dynamic control systems that can adapt to changing in the management process measured and controlled (informative) parameters of the studied object, and provide the invariance of the result of the conversion to parameters of the investigated object, as well as to environmental factors and channel information-measuring and control systems (interference, disturbance, noise parameters, etc.).

Key words: equivalent circuit, measurement converters, parametric sensors, the coordinate-parametric control.

E-mail: sbl@penzgtu.ru, BFH58@mail.ru.

Тенденции развития современных технических систем, и, в их числе, информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС), состоят, в частности, в практическом использовании при проектировании ИИУС положений и выводов фундаментальных теорий автоматического управления, указывающих направления и способы оптимизации таких систем. Безусловно, измерительные системы имеют ряд специфических особенностей по сравнению с системами управления, регулирования и др., однако базовые положения технической кибернетики охватывают и применимы ко всем видам ИИУС.

На этом основании предложено использование для совершенствования ИИУС и их каналов, осуществляющих измерительное преобразование искомых параметров исследуемых объектов с помощью параметрических датчиков (ПД), т.е. измерительных преобразователей (ИП), методов информационно-технической кибернетики, имеющих своей целью обеспечение инвариантности результата преобразования к параметрам исследуемого объекта (ИО) а также к факторам, вносимым окружающей средой и самим каналом ИИУС (помехи, возмущения, паразитные параметры и т.п.), относимым в данном измерительном эксперименте к неинформативным параметрам [1].

Методологические основы проектирования измерительных преобразователей выходных параметров параметрических датчиков. Одним из практически значимых в рассматриваемой предметной области результатов технической кибернетики является предложенный академиком Б.Н. Петровым принцип двухканальной инвариантности [2,3,6,8]. Как следует даже из названия данного принципа, его использование подразумевает введение в техническую систему (например, измерительный преобразователь) избыточности. Вводимая избыточность может быть структурной (в других терминах – пространственной) при использовании дополнительного параллельного канала и алгоритмической (временной) при разделении каналов во времени. Этот вид избыточности реализуется при осуществлении измерительного эксперимента в несколько последовательных во времени этапов (тактов).

В дальнейшем в работах, прежде всего, учёных ИПУ РАН, идеи академика Б.Н. Петрова были развиты. В частности, предложено использовать для обеспечения адаптивного управления в рассмотренном выше смысле не только целенаправленные изменения параметров собственно регулятора, т.е. реализовать координатное управление, но и осуществлять целенаправленное изменение параметров самого исследуемого (управляемого) объекта – параметрическое управление.

Для реализации адаптивного координатно-параметрического управления (АКПУ) используются специально и целенаправленно формируемые управляющие сигналы управления, обеспечивающие адаптацию регулятора (в рассматриваемом контексте ИП) и контролируемое целенаправленное изменение параметров состояния ИО [3].

Целесообразность использования методологии АКПУ при разработке ИП для ПД обусловлена, прежде всего, естественным разделением ИО и ПД, и, в то же время, учитывает органическую связь и взаимообусловленность этих составных частей канала ИИУС. На этом основании предложено исследуемый объект в совокупности с ПД рассматривать как единую подсистему, для которой имеет место априори известная функциональная связь определяемого в данном измерительном эксперименте параметра ИО $x(t)$ и некоторого параметра выходного электрического сигнала данной подсистемы $y(t)$ (информативного сигнала), являющегося носителем информации. Обработка информативного сигнала (аналоговая, цифровая, комбинированная) даёт оценку x^* искомого параметра x ИО как результат преобразования. В соответствии с методологией АКПУ предлагается трактовать параметры комплекса «ИО-ПД» как параметры его состояния и определять задачу идентификации этих параметров как цель синтеза структуры и алгоритма работы ИП.

Базовая структурная схема ИП. Изложенный выше обобщённый алгоритм преобразования реализует базовая схема построения измерительного преобразователя как системы АКПУ (рисунок 1):

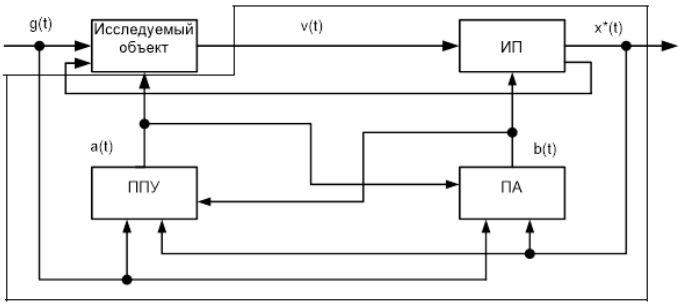


Рисунок 1 – Структурная схема ИП как системы с адаптивным координатно-параметрическим управлением

На рисунке 1 ПА – подсистема адаптации, ППУ – подсистема параметрического управления [4]. При этом $g(t)$ есть некоторое возбуждающее воздействие, инициирующее физический процесс в ИО, характеризуемый искомым параметром x ИО (информативным в данном измерительном эксперименте). Для обеспечения требуемого соотношения $x^* = x$ необходимо синтезировать соответствующие управления $a(t)$ и $b(t)$ [3] .

Решение задачи синтеза ИП принципиально возможно, если ИО – объект, управляемый по Калману [5], и технически управляемый в фазовом пространстве $\{x, x^*, t\}$, т.е. теоретически существует и технически реализуемо такое управление u (рисунок 2), которое в течение измерительного эксперимента) обеспечивает требуемые изменения параметров состояния подсистемы ИО-ПД. Принципиальная возможность такого решения показана, в частности, в работе [6]. Напомним, что определяющей задачей синтеза ИП, решение которой обсуждается в настоящей статье, является обеспечение инвариантности результата преобразования x^* к неинформативным параметрам ИО, ПД, паразитным параметрам среды, линии связи и процессам их неконтролируемых вариаций в течение времени преобразования.

Одним из способов реализации методов АКПУ при построении ИП с ПД является организация избыточности, понимаемой в каноническом смысле как использование дополнительных аппаратных, алгоритмических и программных средств для выполнения функций, реализация которых приводит в рассматриваемом случае к обеспечению инвариантности преобразования.

Обобщенная структурная схема ИП параметров средств исследуемого объекта с использованием ПД представлена на рисунке 2 [7].

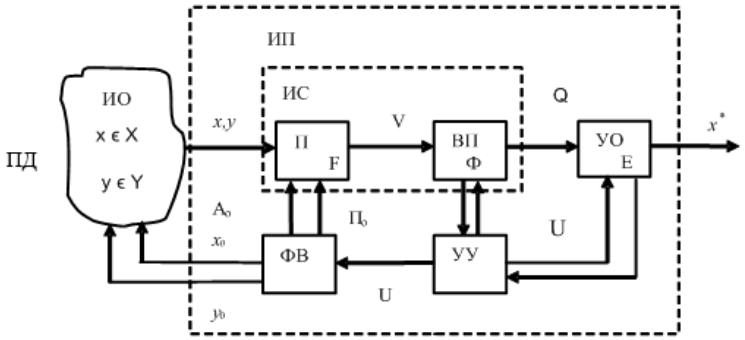


Рисунок 2 – Обобщенная структурная схема ИП параметров исследуемого объекта

Здесь ИО характеризуется множествами измеряемых параметров X (информативных) и не измеряемых в данном опыте (неинформативных) параметров Y.

Модель комплекса ИО-ПД представляется эквивалентной схемой (ЭС), представляющей собой сложную пассивную электрическую цепь (ЭЦ); обозначим множество её параметров как П. Информативный параметр $\Pi_x \in \Pi$ (например, в случае емкостного датчика – электрическая емкость C), связан с информативным параметром x ИО априори известной, нормированной зависимостью. Влияние других – неинформативных параметров ЭС ПД – $\Pi_y \in \Pi$ должно быть минимализировано. В измерительном эксперименте указанные параметры ЭС ПД при приложении к датчику возбуждающего электрического воздействия A_0 от формирователя воздействия (ФВ) и при участии опорных пассивных параметров Π_0 преобразуются в электрический информативный сигнал

$$V = F\left[A_0, (\Pi_0), \Pi_x, \Pi_y, t\right], \qquad (1)$$

здесь F – оператор преобразования параметров Π в электрический сигнал V.

ФВ вносит непосредственно в ИО калиброванные приращения характеризующих ИО физических величин x_0, y_0; таким образом осуществляется параметрическое управление.

Вторичный преобразователь (ВП) преобразует определенный параметр выходного сигнала ИЦ V (амплитуду, мгновенное значение, фазовый сдвиг и др.) в априори заданный параметр-признак $q \in Q$.

В случаях, когда возможна простейшая модель «ИО-ПД» (неинформативными параметрами Y, Π_y пренебрегают) значение признака q непосредственно определяет измеряемый параметр ИО x, и задача обеспечения инвариантности неактуальна. Однако, уже при более адекватной модели двухэлементной ЭС ПД множество параметров–признаков Q суть семейство функций параметров сигнала V, определяемых, соответственно, параметрами исследуемого объекта, ЭС ПД x, y, Π_x, Π_y) и возбуждающего воздействия:

$$Q = \Phi(V, t), \qquad (2)$$

где Φ – оператор преобразования ВП.

Для получения оценки x^* информативного параметра x ИО, инвариантной к параметрам Y, Π_y) в виде

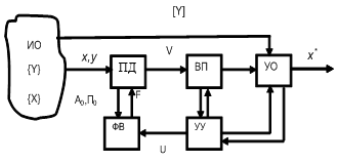
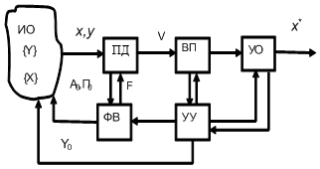
$$x^* = E(Q,t) \qquad (3)$$

необходимо использование координатного управления, реализуемого как преобразование признаков Q в специальном узле ИП (узле обработки УО) с оператором E. Способы построения УА, т.е. реализации функции преобразования в виде (3), предложено упорядочить в виде таблицы 1.

Схема 1 таблицы1 может быть реализована, если известны значения (или диапазоны изменения) неинформативных параметров Y и Π_y; на этом основании осуществляется текущая или итоговая коррекция результата преобразования с целью устранения его зависимости от неинформативных параметров.

Схема 2 основана на возможности осуществления условий постоянства неинформативных параметров Y, Π_y) хотя бы в течение времени преобразования; осуществляется стабилизация (непосредственно или опосредованно) неинформативных параметров.

Таблица 1 – Способы построения УА

№	Обобщенная схема ИП	Определение группы ИП
1		Учет неинформативных параметров Y и Π_y. Осуществление в УО **коррекции** результата преобразования.
2		Установление в ИО и/или в ПД предельно допустимых значений изменения параметров $[Y]$, $[\Pi_н]$. Осуществление **стабилизации** неинформативных параметров

Схемы 1 и 2 построения ИП отличает одноканальность, вследствие чего реализация в них методологии АКПУ принципиально невозможна. Это ограничение существенно ограничивает их возможности и перспективы.

Структурно алгоритмические методы совершенствования измерительных преобразователей для параметрических датчиков. С целью поиска структурно-алгоритмических методов совершенствования ИП и оценки эффективности тех или иных методов предложено формализовать задачу синтеза ИП.

Пусть определено некоторое функциональное пространство параметров ИО и соответствующее им пространство параметров ЭС ПД. Задача синтеза формализуется в виде описания технической системы (ИП), осуществляющей преобразование пространства параметров в соответствующее пространство чисел, содержащее множество оценок искомых физических величин.

Синтез искомой структуры и алгоритма ИП, реализующих указанное отображение, производится на основе операторных соотношений (1–3), объединенных в систему уравнений (4).

$$\begin{cases} V = F(X, Y.A_0, \Pi, U, t), \\ Q = \Phi(V, U, t), \\ X^* = E(Q, U, t). \end{cases} \quad (4)$$

Система операторных уравнений (4) (в соответствии со схемой рисунка 1) представляет собой структурно-математическую модель комплекса ИО «датчик-преобразователь», реализующую базовый алгоритм АКПУ.

Из изложенного следует, что должны быть осуществлены: формализация и техническая аппаратно–программная реализация активных (пассивных) воздействий $A_0(\Pi_0)$, управлений U, операторов E, F, Φ, которые в совокупности обеспечивают решение задачи инвариантного преобразования.

Управления U определяются как ограниченное имеющимися ресурсами множество информационных состояний управляющих входов ИП и/или как программу изменения состояний последних во времени.

Важнейшим условием реализации многоканальных ИП (в смысле акад. Б.Н.Петрова) является асимметричность каналов по отношению к неинформативным параметрам и соответствующим им параметрам информативных сигналов. Асимметричность обеспечивается за счёт различия операторов каналов (качественного и/или количественного) [8].

Наиболее эффективной является организация избыточности непосредственно в ИО путем введения в него характерных приращений физических величин (давления, линейного и углового перемещения, концентрации компонентов смеси и др.), имеющих калиброванные значения (X_0, Y_0). Здесь разделение каналов начинается непосредственно в ИО, что позволяет обеспечить инвариантность к возможно большему числу неинформативных параметров, паразитных параметров и помех, имеющих место в тракте преобразования. Этот подход непосредственно реализует идею акад. Б.Н. Петрова о том, что «…для задачи адаптивного управления необходимым может оказаться не только изменение регулятора, но и целенаправленное изменение параметров самого объекта в процессе его функционирования».

Следующей возможностью организации избыточности является возможность введения калиброванных вариаций параметров собственно датчика – Π_x, $\Pi_y - \Delta\Pi_x$, $\Delta\Pi_y$. Преимущество этого способа заключается в относительно простой технической реализации этого подхода за счёт наличия достаточно точных опорных пассивных элементов.

Существенным преимуществом организации избыточности введением калиброванных изменений параметров непосредственно в ИО и ПД является возможность использования неизменных операторов преобразования, за счёт чего иногда можно не использовать (или серьёзно упростить) реализацию координатного управления [9].

Таким образом, для обоснования возможности и целесообразности использования для синтеза измерительных преобразователей координатно–параметрического управления применялись методика системного анализа, положения технической кибернетики теории управления в технических системах.

Имеющееся разнообразие методов и средств измерительного преобразования, анализ существа выраженной спецификой последнего применительно

к пассивным электрическим цепям различной конфигурации и сложности и сводящимся к таким электрическим цепям эквивалентным схемам параметрических датчиков различных физических величин выявили ограниченность консервативных подходов к построению измерительных преобразователей и необходимость актуализации в этой области измерительной техники базовых положений теории автоматических систем управления и, в частности, теории инвариантности.

В статье показано, что для достижения адаптации средства измерений в указанном смысле с учётом особенностей исследуемого объекта необходимо при проектировании измерительных преобразователей вводить в рассмотрение комплексную структуру «исследуемый объект-датчик», характеризуемую эквивалентной схемой в виде сложной пассивной электрической цепи, а также применять алгоритмы координатно-параметрического управления.

На основе анализа способов построения измерительных преобразователей и направлений их совершенствования в части расширения функциональных возможностей, повышения точностных и улучшения эксплуатационных характеристик показана перспективность использования идей адаптивного координатно-параметрического управления. Показано, что практически целесообразно реализовать данные идеи посредством организации в структурах и алгоритмах измерительных преобразователей избыточности, соответственно, структурной и/или временной.

Список литературы

1. *Свистунов, Б.Л. Концептуальные основы проектирования унифицирующих преобразователей для параметрических датчиков. Доклад XII научно-технической конференции «Датчики и преобразователи систем измерения, контроля и управления» (Датчик-2000), – М. – С.18.*
2. *Петров, Б.Н. Принцип инвариантности в измерительной технике / Б.Н. Петров, В.А. Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков. – М.: Наука, 1976. – 242 с.*
3. *Петров, Б.Н. Адаптивное координатно – параметрическое управление нестационарными объектами / Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, С.Д. Земляков. – М.: Наука, 1980. – 218 с.*
4. *Глумов, В.М. Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами: некоторые результаты и направления развития / В.М. Глумов, С.Д. Земляков, В.Д. Рутковский // Автоматика и телемеханика, №6, 1999. – С.100-116.*
5. *Артамонов, П.И. Использование структурной и временной избыточности в преобразователях / П.И. Артамонов, Дементьева Е.С., Кузьмин А.А. // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс: научно-методический журнал. – Пенза.: ПензГТУ, 2016. – №5 (33). – С. 82-89.*
6. *Петров Б.Н. Структура абсолютно инвариантных систем и условия их физической осуществимости / Б.Н. Петров, А.И. Кухтенко// Теория инвариантности в системах автоматического управления: Сб. научн. трудов. – М.: Наука, 1969 – С. 26 – 48.*
7. *Артамонов, П.И. Преобразователи ёмкости датчиков в унифицированные сигналы со структурной и временной избыточностью / П.И. Артамонов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П.Королёва (НИУ). – 2013. – №2(40). – С.146-154.*

8. *Петров Ю.П. Синтез оптимальных систем управления при не полностью известных возмущениях. – Л.: ЛГУ, 1987. – 289 с.*
9. *Свистунов Б.Л. Классификация способов построения инвариантных средств измерения параметров электрических цепей // Датчики и системы, №2(45), 2003. – С.14-17.*

УДК 621.314.632:62-52
ББК 34

ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ДЛЯ ПОДБОРА СИЛОВЫХ ТИРИСТОРОВ И ДИОДОВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ВКЛЮЧЕНИИ

© ***А.В. Мускатиньев,*** *Национальный исследовательский мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева (г. Саранск, Россия)*

PULSED CURRENT GENERATORS FOR SELECTING POWER THYRISTORS AND DIODES IN PARALLEL INCLUSION

© ***A.V. Muskatinyev,*** *National Research Mordovian State University of N.P. Ogaryov (Saransk, Russia)*

В работе обсуждаются особенности измерения импульсного падения напряжения силовых полупроводниковых приборов при их параллельном включении в преобразовательные устройства. Предлагается структура генератора испытательного тока, позволяющая существенно уменьшить энергетические затраты и повысить точность измерения.

Ключевые слова: силовой тиристор, силовой диод, генератор импульсов тока.

The paper discusses the features of the measurement pulse of the voltage drop of power semiconductor devices for their parallel connection to the Converter device. The structure of the test current generator is proposed, which allows to significantly reduce energy costs and improve the measurement accuracy.

Key words: power thyristor, power diode, the pulse generator current.

Силовые тиристоры и диоды широко применяются в преобразователях, используемых на железнодорожном транспорте, металлургических предприятиях, при передаче электрической энергии. Предельные токи современных силовых приборов превышают 5000 ампер, а напряжение - 8000 вольт. Несмотря на это, структура многих преобразователей построена на применении группового соединения силовых полупроводниковых приборов (СПП), то есть используется параллельное и последовательное соединение СПП в плечах преобразователя [1]. Подбор СПП для последовательного соединения можно осуществлять по величине токов утечки с помощью аппаратуры, описанной в [2].

Основным параметром, по которому осуществляют подбор СПП для включения его в параллельную ветвь, является импульсное падение напряжения U_{TM} для тиристоров и U_{FM} для диодов. Для измерения указанных параметров в соответствии с [3] через испытуемый прибор необходимо пропустить одиночный импульс тока полусинусоидальной формы, амплитуда которого в π раз больше предельного значения СПП I_T (I_F), а длительность равна 10 мс (рисунок 1).

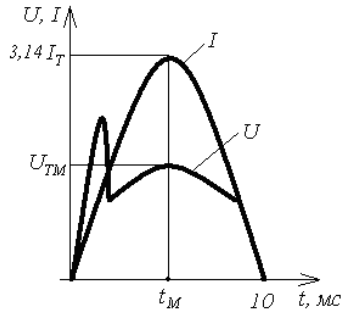


Рисунок 1 – Форма испытательного импульса тока для измерения параметров U_{TM} (U_{FM})

Измерение падения напряжения выполняют в момент времени t_M, соответствующий амплитудному значению испытательного тока. Форма напряжения на СПП при протекании через него испытательного тока имеет некоторые особенности для тиристорных структур. Это связано с конечным временем распространения включенного состояния тиристора. В течение этого времени сопротивление тиристора выше номинального, и на диаграмме напряжения *U* появляется выброс (рисунок 1), амплитуда которого может существенно превышать значение U_{TM}. Этот эффект следует учитывать при построении схем измерения с применением пиковых детекторов или при цифровой обработке результата. Для диодов таких выбросов не наблюдается.

Основным узлом аппаратуры для измерения ряда параметров СПП [4, 5], в том числе и U_{TM} (U_{FM}), является импульсный генератор тока, определяющий массогабаритные параметры и энергоемкость установки. Для формирования импульса тока полусинусоидальной формы длительностью 10 миллисекунд (рисунок 1) применяется одноконтурная структура генератора импульсов, упрощенная функциональная схема которого показана на рисунке 2. В основу этой структуры положен последовательный *LC* контур, в котором предварительно заряженный конденсатор *C* разряжается через дроссель *L*, коммутирующий тиристор *VS* и испытуемый силовой тиристор или диод *ИП*. Сигнал, пропорциональный параметру U_{TM} (U_{FM}), снимается непосредственно с испытуемого прибора *ИП*. Амплитуды импульсных токов генератора могут быть достаточно велики и определяются типом испытуемого прибора. Например, для СПП с предельным током *5000 А* амплитуда импульса тока составляет *15700 А*.

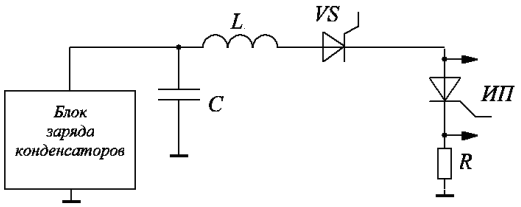


Рисунок 2 – Функциональная схема одноконтурного импульсного генератора тока

Регулировка тока генератора осуществляется изменением напряжения заряда конденсаторов контура, так как его регулировочная характеристика практически линейна. Однако температурный дрейф емкости и сопротивления

дросселя контура требуют периодической коррекции этой характеристики. Для электролитических конденсаторов контура еще добавляется и временной дрейф.

Такие генераторы весьма громоздки и, как правило, входят в состав стационарной испытательной аппаратуры заводов-изготовителей СПП. Переносной вариант установки для подбора СПП в параллельные цепи требует иного подхода к реализации импульсного генератора тока.

В работе предлагается импульсный двухконтурный генератор, формирующий импульс тока, форма которого показана на рисунке 3, а его функциональная схема на рисунке 4.

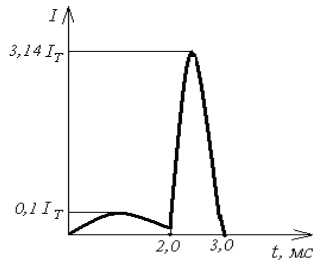


Рисунок 3 – Форма импульсов тока двухконтурного генератора

Работа генератора происходит следующим образом. Сначала первый токовый контур, состоящий из элементов *C1, L1, VS1*, формирует импульс тока, «полку», с амплитудой порядка *0,1* I_T и длительностью в пределах *2,0 мс* (рисунок 3), что необходимо для полного включения испытуемого тиристора (ИП). По сведениям заводов–изготовителей СПП скорость распространения включенного состояния составляет величину порядка *0,015 мм/мкс*. Тогда, например, для СПП с диаметром полупроводниковой пластины *50 мм* время распространения включенного состояния составляет *1,66 мс.* Второй контур *C2, L2, VS2* генератора вырабатывает основной импульс тока длительностью не более 1мс., который частично накладывается на первый. Суммарная амплитуда двух импульсов тока должна быть равной требуемой величине $\pi\ I_T$, при которой измеряются параметры U_{TM} (U_{FM}).

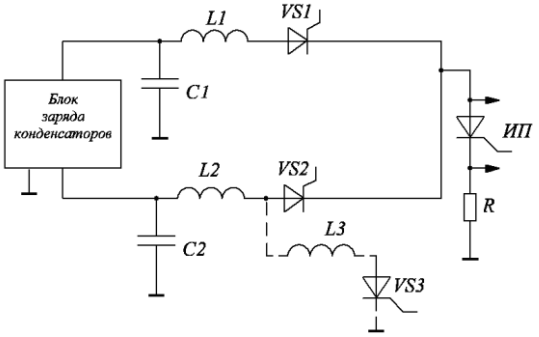


Рисунок 4 – Функциональная схема двухконтурного импульсного генератора тока для измерения параметров U_{TM} (U_{FM})

В основном, массогабаритные параметры установок определяются количеством конденсаторов – накопителей энергии, занимаемый объем которых может превышать 50% общего объема установки. Для примерной оценки массогабаритных параметров установки с разными типами генераторов рассчитаем величину энергии потерь, для одного измерения параметра.

Величина энергии потерь E_a, для измерения параметра U_{TM} (U_{FM}), при использовании однократного испытательного импульса тока (рисунок 1) длительностью t_u определяется формулой (1).

$$E_a = \int_0^{t_u} U(t) I(t)\, dt, \qquad (1)$$

где $I(t) = A\sin(\omega t)$ – полусинусоидальный импульс тока амплитудой А, $U(t) = U_0 + I(t) r_t$ – напряжение на испытуемом приборе, выраженное через параметры кусочно-линейной аппроксимации: U_0 (пороговое напряжение) и r_t (динамическое сопротивление) [1]. Подставляя приведенные величины в (1) получим:

$$E_a = \int_0^{t_u} \left(U_0 A \sin\omega t + A^2 r_t \sin^2 \omega t\right) dt,$$

или после интегрирования [6]:

$$E_a = -\left(U_0 A / \omega\right)\left(\cos\omega t_u - 1\right) - \left(A^2 r_t / 2\omega\right)\left(\cos\omega t_u \sin\omega t_u + \cos\omega t_u - 1\right). \qquad (2)$$

Принимая в (2) $\omega t_u = \pi$, окончательно получим:

$$E_a = \left(A / \omega\right)\left(2U_0 + A r_t\right). \qquad (3)$$

Для двойного испытательного импульса тока (рисунок 3) величина энергии потерь $E_б$ по аналогии с выражением (3) определяется как:

$$E_б = \left(A_1 / \omega_1\right)\left(2U_0 + A_1 r_t\right) + \left(A_2 / \omega_2\right)\left(2U_0 + A_2 r_t\right), \qquad (4)$$

где A_1, ω_1 и A_2, ω_2 – амплитуда и круговая частота первого и второго импульсов соответственно.

Используя формулы (3) и (4) для примера рассчитаем величины E_a и $E_б$ для испытуемого тиристора Т253-1250, у которого $U_0 = 1{,}0$ В, $r_t = 0{,}14 \cdot 10^{-3}$ Ом [1].

Для формулы (3) примем $A = \pi \cdot 1250$ А, $\omega = (2\pi / 20 \cdot 10^{-3})$ рад/с. Тогда $E_a = 56{,}86$ Дж. В формуле (4) считаем, что $A_1 = 0{,}1 \cdot 1250$ А, $\omega_1 = (2\pi / 4 \cdot 10^{-3})$ рад/с, $A_2 = \pi \cdot 1250$ А, $\omega_2 = (2\pi / 2 \cdot 10^{-3})$ рад/с. Тогда $E_б = 5{,}92$ Дж.

Сравнивая значения E_a и $E_б$ можно видеть, что в двухконтурном генераторе тока величина энергии $E_б$, необходимой для одного измерения параметра U_{TM}, в 9,6 раза меньше, чем в одноконтурном генераторе E_a. При использовании в аппаратуре, предназначенной для измерения параметров U_{TM} (U_{FM}), двухконтурного генератора тока можно существенно улучшить ее массогабаритные показатели, практически в 5 - 6 раз. Это дает возможность создавать переносимый вариант прибора для измерения параметров U_{TM} (U_{FM}), что особенно важно для разработчиков преобразовательных устройств и ремонтных служб подвижного состава.

Регулировка тока двухконтурного генератора выполняется изменением напряжения заряда конденсаторов контуров. Поэтому он обладает недостатками одноконтурного генератора.

Силовые приборы можно включать параллельно в том случае, если их разброс значений U_{TM} (U_{FM}) не превышает величины ± 20 мВ. В связи с этим необходимо более точно задавать амплитуду испытательного тока во время испытаний СПП. Для этого в схему генератора (рисунок 4) добавлена дополнительная цепь *L3, VS3,* через которую ответвляется часть испытательного тока

в момент достижения заданного значения. Для реализации такого режима работы генератора требуется перезаряд конденсаторов *C1* и *C2* на *(5 – 10)%* выше номинального значения.

При использовании различных генераторов в измерительной аппаратуре результаты измерения параметров U_{TM} (U_{FM}) отличаются друг от друга из-за разницы энергии потерь.

Покажем это на конкретных примерах. На рисунке 5 приведены осциллограммы тока и напряжения, снятые цифровым осциллографом для тиристора с предельным током 1250А [7]. Амплитуда и длительность импульса тока соответствует рисунку 1.

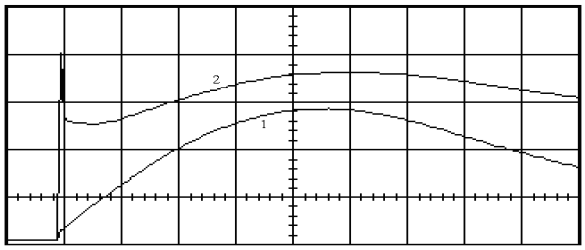


Рисунок 5 – Осциллограммы тока (1) и напряжения (2) для тиристора Т253-1250. Масштаб по вертикали: для тока - напряжение на шунте 0,1 В/дел, для напряжения - 0,5 В/дел. Масштаб по горизонтали - 1 мс/дел. Шунт 500А-75мВ, Iм = 3755 А, U_{TM} = 1,77 В.

На рисунке 6 представлены аналогичные осциллограммы для того же типа тиристора, но с формой импульса тока, близкой к рисунку 3.

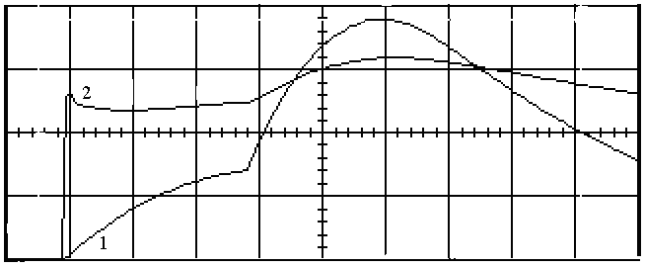


Рисунок 6 – Осциллограммы тока (1) и напряжения (2) для тиристора Т253-1250. Масштаб по вертикали: для тока – напряжение на шунте 0,2 В/дел, для напряжения - 0,5 В/дел. Масштаб по горизонтали - 0,5 мс/дел. Шунт 75А-75мВ, Iм = 3755 А, U_{TM} = 1,59 В.

Из сравнения осциллограмм видно, что значения U_{TM} различаются. Причем для тока с «полкой» (рисунок 6) U_{TM} меньше на 180 мВ по сравнению с обычной формой тока (рисунок 5). Данное обстоятельство позволяет предположить смещение динамической вольтамперной характеристики тиристора в зависимости от формы испытательного импульса тока, а значит и от энергии потерь, что вызывает различный нагрев тиристорной структуры во время испытаний [7]. Для устранения указанной проблемы при подборе тиристоров в параллельное включение необходимо использовать один тип генератора тока.

Список литературы

1. *Чебовский О. Г., Моисеев Л. Г., Недошивин Р.П. Силовые полупроводниковые приборы: справочник. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – с. 23.*
2. *Мускатиньев А. В., Мускатиньев А. А. Особенности измерения токов утечки в силовых полупроводниковых приборах в состоянии низкой проводимости // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2014. № 3 (19). С. 157–163.*
3. *ГОСТ 24461-80 (СТ СЭВ 1656-79). Приборы полупроводниковые силовые. Методы измерений и испытаний; введен с 01.01.82. – М. : Изд – во стандартов, 1981. – 55 с.*
4. *Мускатиньев А. В. Особенности подбора силовых тиристоров для последовательного включения. // Электротехнические комплексы и системы управления. 2014. № 2. С. 72– 78.*
5. *Мускатиньев А. В., Афонин В. В. Проектирование генератора испытательного тока для аппаратуры измерения заряда обратного восстановления силовых тиристоров. // Электротехнические комплексы и системы управления. 2015. № 3. С. 58– 61.*
6. *Список интегралов от тригонометрических функций – [Электронный ресурс]. – Режим доступа:* https://ru.wikipedia.org/wiki/ *Список интегралов от тригонометрических функций.*
7. *Мускатиньев А. В., Мускатиньев А. А. Оптимизация мощных генераторов испытательного тока // Технические и естественные науки: проблемы, теория, эксперимент (Межвузовский сборник научных трудов). – Саранск: 2002. – Вып.II. С. 45-48.*

УДК 519.718
ББК 22

КОРОТКИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ТЕСТ ДЛЯ ОДНОГО КЛАССА СХЕМ[1]

© ***Д.С. Романов,*** *МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)*
© ***Е.Ю. Романова****, Российский государственный социальный университет (г. Москва, Россия)*

SMALL DIAGNOSTIC TEST SET FOR SOME CLASS OF CIRCUITS

© ***D.S. Romanov,*** *Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)*
© ***E.Yu. Romanova,*** *Russian State Social University (Moscow, Russia)*

Сообщается о существовании в базисе $\{x_1x_2\,\&\ldots\&\,x_t,\ x_1\oplus x_2, 1 \mid t=2,3,4,\ldots\}$неизбыточной схемы из функциональных элементов, допускающей полный диагностический тест длины 1 относительно инверсных неисправностей на выходах элементов.

Ключевые слова: схема, диагностический тест, инверсная неисправность.

[1] *Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 16–01–00593-а и 15–01–07474-а, Государственного задания 1.9328.2017/БЧ и Госбюджетной темы НИР факультета ВМК МГУ «Теория дискретных управляющих систем, ее приложения в проектировании СБИС и программировании».*

In the basis $\{x_1x_2 \& \ldots \& x_t,\ x_1 \oplus x_2,\ 1 \mid t = 2,3,4,\ldots\}$ the existence of irredundant combinational circuit allowing complete diagnostic (under inverse faults at outputs of gates) test set consisting of alone vector is presented.

Key words: circuit, diagnostic test set, detection test set, inverse fault.

Одним из подходов к распознаванию наличия неисправностей в схемах является тестовый подход [1-3]. Все не введенные в статье понятия можно найти в книге [3]. Пусть на схему из функциональных элементов (СФЭ) S с управляющими переменными $x_1, x_2, \ldots, x_n$, реализующую булеву функцию $f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$, мог подействовать источник неисправностей U, способный преобразовать схему S к одной из схем (с такими же входами и выходами, что и у S) некоторого заранее известного списка *D* конечной длины, содержащего и исходную схему. Исследование схемы заключается в подаче на входы схемы входных наборов и в изучении выходных значений на этих наборах в предположении, что источник неисправностей более не меняет вида схемы.

Множество T входных наборов называется *диагностическим тестом* для схемы S относительно источника неисправностей U в том и только том случае, когда для любых двух схем S_1, S_2 из списка *D* имеет место импликация: если S_1 и S_2 реализуют неравные булевы функции $f'(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ и $f''(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ соответственно, то найдется набор α из T такой, что $f'(\alpha) \neq f''(\alpha)$. Число наборов в тесте T называется длиной теста. Тесты относительно источника неисправностей U, способного повредить любое число элементов, называются полными. Схема S, при любой (вызванной действием источника неисправностей U) поломке ровно одного элемента реализующая функцию, неравную функции, реализуемой схемой S в отсутствие неисправностей, называется *неизбыточной* относительно U.

В качестве источника неисправностей *U* в данной статье рассматривается источник инверсных неисправностей на выходах элементов, действие которого заключается в том, что в любых функциональных элементах схемы сопоставленные им булевы функции могут быть заменены на их отрицания. Оказывается справедливым следующий несложный, но забавный факт.

Теорема. *При всяком натуральном n для любой булевой функции* $f(x_1, \ldots, x_n)$ *существует реализующая функцию f неизбыточная СФЭ S в бесконечном базисе* $\{x_1x_2 \& \ldots \& x_t,\ x_1 \oplus x_2,\ 1 \mid t = 2,3,4,\ldots\}$ *такая, что длина ее минимального полного диагностического теста относительно инверсных неисправностей на выходах элементов равна* 1.

Доказательство. Пусть, для начала, *f* существенно зависит от не менее чем двух переменных. Перепишем полином Жегалкина функции *f* в виде $K_1 \oplus K_2 \oplus \ldots \oplus K_s \oplus a$, где $K_1, K_2, \ldots, K_s$ — попарно неэквивалентные монотонные конъюнкции натуральных рангов (и $s \in N \cup \{0\}$), $a \in \{0, 1\}$. Схема *S* с входами $x_1, x_2, \ldots, x_n$, реализующая функцию *f*, строится следующим образом.

Каждой конъюнкции $K_i = x_1^{(i)} \& x_2^{(i)} \& ... \& x_{p(i)}^{(i)}$ (где $i = \overline{1,s}$, $1 \le p(i) \le n$, $\{x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, ..., x_{p(i)}^{(i)}\} \subseteq \{x_1, x_2, ..., x_n\}$) в схеме соответствует конъюнктор E_i с $p(i)$ входами, к которым (в произвольном порядке) ведут дуги от входов схемы $x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, ..., x_{p(i)}^{(i)}$. При $a = 1$ в схеме имеется нульвходовый элемент E_{s+1} «константа 1». Кроме того, в схеме имеется $s + a - 1$ двухвходовых элементов сложения по модулю 2: $H_1, H_2, ..., H_{s+a-1}$. К первому входу элемента H_j ведет дуга от выхода элемента H_{j-1} ($j = \overline{2, s+a-1}$), к двум входам элемента H_1 ведут дуги от выходов элементов E_1 и E_2, к второму входу элемента H_j ведет дуга от выхода элемента E_{j+1} ($j = \overline{2, s+a-1}$). Выход элемента H_{s+a-1} является выходом схемы. Пусть теперь f тождественно равна нулю, тогда схема S моделирует формулу $x_1 \oplus x_1$. Если f тождественно равна единице, то схема S моделирует формулу $(x_1 \oplus x_1) \oplus 1$. Если $f = x_q$ (здесь и далее $q \in \{1, 2, ..., n\}$), то схема S моделирует формулу $(x_q \oplus x_q) \oplus x_q$. Если, наконец, $f = \bar{x}_q$, то схема S моделирует формулу $x_q \oplus 1$. Ясно, что в каждом из описанных случаев при отсутствии неисправностей схема S реализует функцию f. При возникновении инверсной неисправности на выходе любого одного элемента реализуется функция $f \oplus 1$, так что S — неизбыточная схема. При возникновении любого нечетного числа инверсных неисправностей на выходах элементов также реализуется функция $f \oplus 1$, а при возникновении любого четного числа инверсных неисправностей на выходах элементов реализуется функция f. Поэтому любой входной набор схемы S образует полный диагностический тест длины 1. Теорема доказана. (Отметим, что при $f = x_q$ имеется и абсолютно надежная схема без функциональных элементов, выход которой совпадает со входом x_q, минимальный полный диагностический тест для которой имеет нулевую длину).

Список литературы

1. *Яблонский С.В., Чегис И.А. О тестах для электрических схем // Успехи матем. наук. 1955. Т. 10, вып. 4 (66). С. 182–184.*

2. *Чегис И.А., Яблонский С.В. Логические способы контроля работы электрических схем // Труды МИ АН СССР. Т. LI. М., 1958. С. 270–360.*

3. *Редькин Н.П. Надежность и диагностика схем. М.: Издательство МГУ, 1992. 192 с.*

УДК 519.718
ББК 30

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОБЗОР НАДЕЖНОСТИ СХЕМ, РЕАЛИЗУЮЩИХ ФУНКЦИИ МНОГОЗНАЧНОЙ ЛОГИКИ [1]

© ***М.А. Алехина,*** *Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*
© ***А.В. Герасимова****, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

INFORMATION REVIEW OF RELIABILITY OF CIRCUITS IMPLEMENTING THE FUNCTIONS OF MANY-VALUED LOGICS

© ***M.A. Alekhina,*** *Penza State Technological University (Penza, Russia)*
© ***A.V. Gerasimova,*** *Penza State Technological University (Penza, Russia)*

В статье приводится информационный обзор о надежности схем из ненадежных функциональных элементов, реализующих функции многозначных логик, при различных неисправностях элементов.

Ключевые слова: ненадежные функциональные элементы, надежность схемы, ненадежность схемы, неисправности элементов.

The article provides an overview of the results on the reliability of circuits of unreliable functional elements that implement the functions of many-valued logics with different element faults.

Key words: unreliable functional gates, reliability of circuits, unreliability of circuits, failures of gates.

E-mail: alekhina@penzgtu.ru

Задачу синтеза надежных схем из ненадежных элементов впервые рассматривал Дж. фон Нейман. Он предполагал, что элементы подвержены инверсным неисправностям на выходах элементов, когда функциональный элемент E с приписанной ему булевой функцией $e(\tilde{x})$ в неисправном состоянии реализует $\bar{e}(\tilde{x})$. Эти же неисправности исследовались затем в работах Р.Л. Добрушина, С.И. Ортюкова, Д. Улига и некоторых других авторов, причем главное внимание уделялось сложности схем.

Эта статья посвящается задачам, где в качестве основного параметра выступает надежность и требуется оценить максимальную надежность схем из ненадежных элементов, реализующих функции k-значной логики ($k \geq 3$). К настоящему времени получено много результатов при решении этой задачи при различных неисправностях. Их обзор приводится в этой статье.

Пусть $n \in N$, $k \geq 3$, $E_k = \{0,1,...,k-1\}$, а P_k – множество всех функций k-значной логики, т.е. функций $f(x_1, \ldots, x_n) : \{E_k\}^n \to E_k$. Рассмотрим реализацию функций из P_k схемами из ненадежных функциональных элементов в полном конечном базисе $B = \{e_1, \ldots, e_q\}$ ($q \geq 1$).

Пусть $f(x_1, \ldots, x_n)$ – произвольная функция k-значной логики. Обозначим $\tilde{x}^n = (x_1, \ldots, x_n)$. Как и раньше [1,2], считаем, что схема S из нена-

[1] *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 17-01-00451.*

дежных функциональных элементов реализует функцию $f(\tilde{x}^n)$, если она реализует эту функцию при отсутствии неисправностей в схеме. Предполагается, что неисправности элементов произвольные и статистически независимые, т.е. элементы схемы (или их входы/выходы) переходят в неисправные состояния независимо друг от друга.

Определим некоторые из неисправностей элементов, которые будут упоминаться в этой статье.

Инверсная неисправность на выходе элемента характеризуется тем, что в исправном состоянии функциональный элемент реализует приписанную ему функцию, а в неисправном – с вероятностью ε $(0<\varepsilon<1/2)$ выдает любое из $k-1$ неверных значений и с вероятностью $1-(k-1)\varepsilon$ – верное значение.

Если неисправность элемента такова, что поступающее на вход значение σ $(\sigma \in E_k)$ с вероятностью $\varepsilon \in (0;1/2)$ может превратиться в любое из значений $\sigma + i \pmod{k}$ $(i \in E_k, i \neq 0,)$, то она называется *инверсной неисправностью на входе элемента*. Тем самым, значение σ остается правильным (не изменяется) с вероятностью $1-(k-1)\varepsilon$.

Если неисправность такова, что элемент (реализующий в исправном состоянии приписанную ему функцию) в неисправном состоянии, в которое переходит с вероятностью ε $(0<\varepsilon<1/2)$, реализует константу c $(c \in E_k)$, будем называть ее *неисправностью типа* c *на выходе элемента*.

Если неисправность элемента такова, что поступающее на его вход значение c не искажается, а любое другое поступающее на его вход значение с вероятностью ε $(0<\varepsilon<1/2)$ может превратиться в c $(c \in E_k)$, будем называть ее *неисправностью типа* c *на входе элемента*.

Пусть $f(\tilde{x}^n)$ – произвольная функция из P_k, а S – любая схема, реализующая эту функцию. Пусть $\tilde{a}^n$ – произвольный входной набор схемы S, а $f(\tilde{a}^n)=\tau$ $(\tau \in E_k)$. Обозначим через $P_{f(\tilde{a}^n)\neq\tau}(S,\tilde{a}^n)$ – вероятность появления значения, отличного от τ на выходе схемы S, реализующей функцию $f(\tilde{x}^n)$, при входном наборе $\tilde{a}^n$ (т.е. $P_{f(\tilde{a}^n)\neq\tau}(S,\tilde{a}^n)$ – вероятность ошибки на входном наборе $\tilde{a}^n$).

Ненадежностью $P(S)$ схемы S, реализующей $f(\tilde{x}^n)$, назовем максимальную из вероятностей ошибок при всевозможных входных наборах $\tilde{a}^n$ схемы S. *Надежность* схемы равна $1-P(S)$.

Пусть $P_\varepsilon(f)=\inf P(S)$, где S – схема из ненадежных элементов, реализующая булеву функцию $f(\tilde{x}^n)$. Схему A из ненадежных элементов, реализующую булеву функцию $f(\tilde{x})$, будем называть асимптотически оптимальной по надежности, если $P(A) \sim P_\varepsilon(f)$ при $\varepsilon \to 0$.

Напомним также, что в теории надежности управляющих систем *надежной схемой* называют схему, ненадежность которой сравнима с ненадежностью отдельного элемента базиса.

При $k = 2$ [3] известно, что ненадежность схемы S, реализующей булеву функцию $f(\tilde{x}^n)$, равна ненадежности двойственной схемы S^*, построенной из элементов базиса $B^* = \{e_1^*, \ldots, e_q^*\}$ и реализующей функцию $f^*(x_1, \ldots, x_n) = \overline{f}(\overline{x}_1, \ldots, \overline{x}_n)$, двойственную функции $f(\tilde{x}^n)$. (Здесь e_j^* – булева функция, двойственная булевой функции e_j.)

Это свойство дает возможность переносить результаты о ненадежности схемы S, реализующей булеву функцию f, в базисе B при однотипных константных неисправностях типа c на выходах (входах) элементов, в другой, двойственный базис B^* для схемы S^*, реализующей двойственную булеву функцию f^* при однотипных константных неисправностях типа $\overline{c}$ на выходах (входах) элементов.

Возникают вопросы: «Имеет ли место подобное свойство в P_k ($k \geq 3$)?», «Если “да”, то для каких базисов, функций и неисправностей? А главное – относительно какой перестановки рассматривать двойственность ?»

Ответы на эти вопросы для функций k-значной логики получены автором и содержатся в теоремах 1 и 2, а также в следствии. Введем понятие двойственной функции в P_k.

Функцию $f^*(x_1, \ldots, x_n) = N(f(Nx_1, \ldots, Nx_n))$ (здесь функция $Nx = (k-1) - x$ – отрицание Лукашевича) назовем функцией, *двойственной* функции $f(x_1, \ldots, x_n)$ относительно перестановки на множестве $\{0, 1, \ldots, k-1\}$, которую задает функция Nx.

В P_k понятие двойственной функции вводится относительно перестановки на множестве E_k, но поскольку других перестановок, кроме той, что задает функция Nx, в этой статье мы не рассматриваем, далее будем говорить о двойственности схем, не упоминая перестановку.

Обозначим $N(\tilde{x}^n) = (Nx_1, \ldots, Nx_n)$. Нетрудно доказать теорему о суперпозиции двойственных функций.

Теорема 1. Если $F(\tilde{x}^n) = f(f_1(\tilde{x}^n), \ldots, f_p(\tilde{x}^n))$, то $F^*(\tilde{x}^n) = f^*(f_1^*(\tilde{x}^n), \ldots, f_p^*(\tilde{x}^n))$ ($p \in N$).

Нетрудно видеть, что $(x)^* = N(Nx) = x$.

Ненадежный функциональный элемент E_j^* ($j \in \{1, 2, \ldots, q\}$) с приписанной ему функцией $e_j^*(\tilde{x}^m)$ ($m \geq 1$) назовем *двойственным* элементу E_j с функцией $e_j(\tilde{x}^m)$, если функция $e_j^*(\tilde{x}^m)$ двойственна функции $e_j(\tilde{x}^m)$ и для

любого $i \in E_k$ и любого входного набора $\tilde{a}^m$ элемента E_j верно равенство $P_i(E, \tilde{a}^m) = P_{Ni}(E^*, N(\tilde{a}^m))$, где $N(\tilde{a}^m) = (Na_1, ..., Na_m)$.

Две схемы S и S^* назовем *двойственными*, если одна получается из другой заменой всех элементов на двойственные им элементы соответственно. Очевидно, что если схема S реализует функцию $f(x_1, \ldots, x_n)$, то схема S^* реализует двойственную функцию ей функцию $f^*(x_1, \ldots, x_n) = N(f(Nx_1, \ldots, Nx_n))$ (см. теорему 1).

Теорема 2. Пусть S – любая схема с n входами и одним выходом, $f(\tilde{x}^n)$ – функция, которую реализует схема S. Тогда для любого $i \in E_k$ и для любого входного набора $\tilde{a}^n$ схемы S верно равенство

$$P_i(S, \tilde{a}^n) = P_{Ni}(S^*, N(\tilde{a}^n)),$$

где S^* – схема, двойственная схеме S, $f^*(\tilde{x}^n)$ – функция, двойственная функции $f(\tilde{x}^n)$, которую реализует схема S^*, $N(\tilde{a}^n) = (Na_1, ..., Na_n)$.

Следствие. Ненадежности двойственных схем S и S^* равны, т.е. верно равенство $P(S) = P(S^*)$.

Таким образом, надежности двойственных (относительно перестановки, определяемой функцией Nx) схем также равны для функций k-значной логики.

В частности, например, утверждение о надежности схемы, реализующей k-значную функцию f, в базисе B:

– при однотипных константных неисправностях типа c ($c \in E_k$) на выходах элементов справедливо для надежности двойственной схемы, реализующей функцию f^*, в базисе B^* при однотипных константных неисправностях типа Nc на выходах элементов;

– при инверсных неисправностях на выходах элементов справедливо для надежности двойственной схемы, реализующей функцию f^*, в базисе B^* при инверсных неисправностях на выходах элементов.

Опишем известные результаты, относящиеся к теме статьи, при различных неисправностях элементов.

1. Инверсные неисправности на выходах элементов

1.1. В P_3

1) в базисе Россера-Туркетта [4] и двойственном ему базисе построены асимптотически оптимальные по надежности схемы;

2) в базисе, состоящем из функции Вебба и двойственном ему базисе построены надежные схемы (М.А. Алехина, О.Ю. Барсукова, 2015);

3) в базисе, содержащем функцию специального вида [5], и двойственном ему базисе построены асимптотически оптимальные по надежности схемы.

1.2. В P_k

1) в базисе Россера-Туркетта и двойственном ему базисе построены асимптотически оптимальные по надежности схемы (М.А. Алехина, О.Ю. Барсукова, Моисеев А.В., 2017);

2) в базисе, содержащем функцию специального вида [5], и двойственном ему базисе построены асимптотически оптимальные по надежности схемы.

2. Однотипные константные неисправности на выходах элементов

2.1. В P_3 в базисе Россера-Туркетта и двойственном ему базисе построены асимптотически оптимальные по надежности схемы (М.А. Алехина, О.Ю. Барсукова, П.Г. Пичугина, 2017).

2.2. В P_k в базисе Россера-Туркетта и двойственном ему базисе построены асимптотически оптимальные по надежности схемы при неисправностях типа 0 ($k-1$) (М.А. Алехина, О.Ю. Барсукова, 2017).

Список литературы

1. *Алехина М.А. Синтез схем из ненадежных элементов в P_k // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – № 3. – 2015 г. – С. 3–10.*
2. *Алехина М.А., Грабовская С.М. О надежности неветвящихся программ в произвольном полном конечном базисе // Известия высших учебных заведений. Математика. – 2012. – № 2 – С. 13–22.*
3. *Алехина М. А., Шилов А.В. Верхние оценки ненадежности схем в некоторых базисах при инверсных неисправностях на выходах элементов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. – 2006. № 5 (26). – С. 4–12.*
4. *Алехина М.А., Барсукова О.Ю. Оценки ненадежности схем в базисе Россера – Туркетта // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – № 1 (29). – 2014 г.– С. 5–19.*
5. *Алехина М.А., Барсукова О.Ю. О надежности схем, реализующих функции трехзначной логики // Дискретный анализ и исследование операций. – 2014 г. – Том 21, № 4. – С. 12–24.*

УДК 519.714
ББК 22

НЕМОНОТОННАЯ СЛОЖНОСТЬ КАК ОБОБЩЕНИЕ ИНВЕРСИОННОЙ СЛОЖНОСТИ

© ***В.В. Кочергин***, *МГУ имени М. В. Ломоносова* (*г. Москва, Россия*)
© ***А.В. Михайлович***, *НИУ ВШЭ* (*г. Москва, Россия*)

NONMONOTONE COMPLEXITY AS THE EXTENTION OF THE INVERSION COMPLEXITY

© ***V.V. Kochergin,*** *Lomonosov Moscow State University* (*Moscow, Russia*)
© ***A.V. Mikhailovich,*** *Higher School of Economics* (*Moscow, Russia*)

Рассматривается задача об экономной реализации булевых функций и функций многозначной логики схемами из функциональных элементов в бесконечном базисе, состоящем из всех монотонных и конечного числа немонотонных функций, причем мерой качества реализации яв-

ляется немонотонная сложность — число использований немонотонных элементов (монотонные функции «бесплатны»). Для случая реализации систем булевых функций в базисе, содержащем помимо монотонных функций только отрицание, А.А. Марковым установлено точное значение немонотонной сложности (называемой в этом случае инверсионной сложностью). В настоящей работе дан обзор результатов, обобщающих теорему Маркова, а также представлены новые оценки немонотонной сложности.

Ключевые слова: логические схемы, схемы из функциональных элементов, сложность булевых функций, сложность функций многозначной логики, схемная сложность, инверсионная сложность, немонотонная сложность, теорема Маркова.

The problem of the effective realization of Boolean functions and multi-valued logic functions by circuits in some infinite bases is considered. The bases consist of all monotone functions and finite number of non-monotone functions. The measure of the realization efficiency is non-monotone complexity. That is the number of non-monotone elements in the circuit (we assume that all monotone elements are «free»). The case of Boolean basis that consists of all monotone functions and negation function was considered by Markov. He established the exact value of the non-monotone complexity (it is also named «inversion complexity» in that case). This paper include survey of Markov theorem generalizations and several new estimations of the non-monotone complexity.

Key words: logic circuits, complexity of Boolean functions, complexity of multi-valued logic functions, inversion complexity, nonmonotone complexity, Markov's theorem.

E-mail: vvkoch@yandex.ru; anna@mikhaylovich.com

Рассматривается реализация произвольной системы функций k-значной логики, $k \geq 2$, схемами из функциональных элементов (см., например, [9, 13]). Исследуется задача о наименьшем числе использований немонотонных функций k-значной логики из заданного конечного множества (при этом монотонные функции можно использовать без ограничений). Все полученные результаты можно рассматривать как различные обобщения классических теорем А.А. Маркова [10, 11] об инверсионной сложности булевых функций.

Определения

Пусть P_k — множество всех функций k-значной логики ($k \geq 2$), M — класс всех функций из P_k, монотонных относительно порядка $0 < 1 < \ldots < k\text{-}1$, а B — бесконечный базис (под базисом понимается произвольная функционально полная система), имеющий вид

$$B = M \cup \{\omega_1, \ldots, \omega_p\}, \ \ \omega_i \in P_k \ , \ \ M, \ \ i = 1, \ldots, p \ \ (p \geq 1).$$

Определим *немонотонную сложность* $I_B(S)$ *схемы* S *над базисом* B как общее число всех немонотонных элементов схемы S, т.е. элементов, которым приписаны немонотонные функции базиса. В терминах сложности реализации функций в базисах с нулевыми весами (см., например, [12]) $I_B(S)$ — суммарный вес всех входящих в схему S элементов базиса B, при этом вес всех монотонных функций базиса считается нулевым, а немонотонных — единичным.

Немонотонную сложность функции k*-значной логики* f *над базисом* B, обозначаемую $I_B(f)$, определим как минимальную немонотонную сложность схем, вычисляющих над базисом B функцию f. Отметим, что для произвольной функции f и любого базиса B', получающегося из базиса B путем замены множества всех функций из класса M на какое-либо порождающее множество класса M, выполняется равенство $I_{B'}(f) = I_B(f)$.

Аналогично определяется *немонотонная сложность* $I_B(F)$ *системы функции* k*-значной логики* F *над базисом* B.

В случае реализации булевых функций в базисе $B_0 = M \cup \{\overline{x}\}$ немонотонную сложность обычно называют *инверсионной сложностью*.

Чтобы сформулировать основные результаты дадим еще несколько определений.

Обозначим множество {0, 1, …, *k*-1} через E_k. Последовательность $\tilde{\alpha}_1=(\alpha_{11},\ldots,\alpha_{1n})$, $\tilde{\alpha}_2=(\alpha_{21},\ldots,\alpha_{2n})$, …, $\tilde{\alpha}_r=(\alpha_{r1},\ldots,\alpha_{rn})$ наборов из множества E_k^n назовем *возрастающей цепью относительно порядка* 0<1<…<*k*-1 или просто *цепью*, если все наборы $\tilde{\alpha}_1,\tilde{\alpha}_2,\ldots,\tilde{\alpha}_r$ различны и выполняются неравенства $\alpha_{ij}\le\alpha_{i+1,j}$, $i=1,\ldots,r-1$, $j=1,\ldots,n$.

Пусть $f(x_1,\ldots,x_n)$ — функция *k*-значной логики. Упорядоченную пару наборов $\tilde{\alpha}=(\alpha_1,\ldots,\alpha_n)$ и $\tilde{\beta}=(\beta_1,\ldots,\beta_n)$, $\tilde{\alpha},\tilde{\beta}\in E_k^n$, будем называть *обрывом для функции f*, если выполнены условия: $\alpha_j\le\beta_j$ $(j=1,\ldots,n)$; $f(\tilde{\alpha})>f(\tilde{\beta})$.

Обрывом для системы функций будем называть любую пару наборов, являющуюся обрывом хотя бы для одной функции системы.

Пусть $F=\{f_1,\ldots,f_m\}$, $m\ge1$, — система функций *k*-значной логики от переменных $x_1,\ldots,x_n$, а *C* — цепь, имеющая вид $\tilde{\alpha}_1,\tilde{\alpha}_2,\ldots,\tilde{\alpha}_r$. Под *падением* $d_C(F)$ *системы F на цепи C* будем понимать число обрывов для системы *F* на парах вида $(\tilde{\alpha}_i,\tilde{\alpha}_{i+1})$.

Спад $d(F)$ системы *F* определим равенством $d(F)=\max d_C(F)$, где максимум берется по всем цепям *C*.

Инверсионная сложность булевых функций

По-видимому, первые нетривиальные результаты относительно минимального числа отрицаний, достаточного для реализации произвольной булевой функции, были получены [16] в 1954 г. Э. Гилбертом в рамках другой вычислительной модели — контактных схем.

А.А. Марковым в 1957–1963 гг. установлено [10, 11] точное значение инверсионной сложности для произвольной конечной системы *F* булевых функций: $I_{B_0}(F)=\lceil\log_2(d(F)+1)\rceil$. Этот результат, известный как теорема Маркова, стал классическим.

В 1961 г. Э.И. Нечипоруком найдено [12] точное значение инверсионной сложности для любой булевой функции в классе схем без ветвления выходов элементов (формул). Этот факт «переоткрыт» [22] в 2008 г. Х. Моризуми.

Вообще, количество публикаций, в которых затрагиваются различные вопросы задачи о вычислении булевых функций с использованием минимально возможного числа отрицаний, достаточно велико (см., в частности, [14, 23–26]), причем особый интерес, начиная с середины девяностых годов прошлого века, эта тематика вызывает в Японии. Стоит еще отметить обзор М. Фишера [15] и монографию С. Юкны [18], а также работу [17] о некоторых криптографических аспектах этой задачи.

Немонотонная сложность булевых функций

Перейдем к результатам авторов о немонотонной сложности.

В 2015 г. установлена асимптотика роста немонотонной сложности произвольной последовательности F_n систем булевых функций при $d(F_n)\to\infty$.

Теорема 1 [1, 19]. *Для любого базиса B, имеющего вид* $B = M \cup \{\omega_1, \ldots, \omega_p\}$, $\omega_i \in P_2$, M, $i = 1, \ldots, p$, *где все монотонные функции имеют нулевой вес, а функции* $\omega_1, \ldots, \omega_p$ *— единичный вес, найдется такая константа c(B), что для любой системы F функций из* P_2 *выполняются неравенства* $\lceil \log_2(d(F)+1) \rceil - c(B) \le I_B(F) \le \lceil \log_2(d(F)+1) \rceil$.

Эта теорема дает верхнюю и нижнюю оценки немонотонной сложности систем булевых функций, отличающиеся не более чем на константу. Однако этот результат далёк от окончательного, так как эта константа зависит от базиса, причем для любой константы можно подобрать базис рассматриваемого вида и булеву функцию так, что разность верхней оценки из теоремы 1 и реальной немонотонной сложности этой функции превосходит эту константу.

Точное значение немонотонной сложности произвольной булевой функции установлено в 2017 г.

Теорема 2 [5–7]. *Пусть базис B имеет вид* $B = M \cup \{\omega_1, \ldots, \omega_p\}$, $\omega_i \in P_2$, M, $i = 1, \ldots, p$, *где все монотонные функции имеют нулевой вес, а функции* $\omega_1, \ldots, \omega_p$ *— единичный вес. Тогда для любой булевой функции f выполняется равенство*

$$I_B(f) = \left\lceil \log_2 \left(\frac{d(f)}{D(B)} + 1 \right) \right\rceil,$$

где $D(B) = \max\limits_i \{d(\omega_i)\}$.

Немонотонная сложность функций *k*-значной логики

Для того, чтобы сформулировать полученные результаты о немонотонной сложности в общем случае (при реализации функций *k*-значной логики, $k \ge 2$), требуется ввести еще некоторые понятия.

Для произвольной функции *k*-значной логики $f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ и произвольной цепи $C = (\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \ldots, \tilde{\alpha}_r)$ наборов из E_k^n определим величину $u_C(f)$ как наибольшую длину *t* подпоследовательности $\tilde{\beta}_1, \tilde{\beta}_2, \ldots, \tilde{\beta}_t$ последовательности *C*, удовлетворяющей условию $f(\tilde{\beta}_1) > f(\tilde{\beta}_2) > \ldots > f(\tilde{\beta}_t)$.

Теперь определим *инверсионную силу u(f) функции f* равенством $u(f) = \max u_C(f)$, где максимум берется по всем цепям C наборов из E_k^n. Очевидно, что для любой функции *f* выполняются соотношения $1 \le u(f) \le d(f) + 1$, при этом если функция *f* не является монотонной, то справедливо неравенство $u(f) \ge 2$.

Наконец, для базиса *B* функций *k*-значной логики равенством $u(B) = \max u(f)$, где максимум берется по всем функциям *f* из базиса *B*, введем величину *u*(*B*) — *инверсионную силу базиса B*.

Асимптотика роста немонотонной сложности произвольной последовательности F_n систем функций k-значной логики при условии $d(F_n)\to\infty$ установлена в 2016 г.

Теорема 3 [2, 5, 21]. *Для любого базиса B, имеющего вид $B=M\cup\{\omega_1,\ldots,\omega_p\}$, $\omega_i\in P_k$, M, $i=1,\ldots,p$, где все монотонные функции имеют нулевой вес, а функции $\omega_1,\ldots,\omega_p$ — единичный вес, найдется такая константа $c(B)$, что для любой системы F функций из P_k выполняются неравенства* $\left\lceil \log_{u(B)}(d(F)+1)\right\rceil - c(B)\le I_B(F)\le\left\lceil \log_{u(B)}(d(F)+1)\right\rceil$.

Отметим, что в теореме 3 заменить константу $c(B)$, зависящую от базиса, на абсолютную константу нельзя: для любого $k\ge2$ и для любого заданного значения N найдется базис B_N в P_k и функция $g_N\in P_k$, для которых справедливо неравенство $\left\lceil \log_{u(B_N)}(d(g_N)+1)\right\rceil - I_{B_N}(g_N)>N$.

Теперь перейдем к задаче о немонотонной сложности над двумя естественными базисами функций k-значной логики, а именно, базисами $B_P=M\cup\{N_P(x)\}$ и $B_L=M\cup\{N_L(x)\}$, где $N_P(x)$ — отрицание Поста, т. е. функция $x+1 \pmod k$, а $N_L(x)$ — отрицание Лукасевича, т. е. функция $k-1-x$. Для этих базисов в 2015 г. получен в некотором смысле окончательный результат.

Теорема 4 [3, 20]. *Для любой конечной системы F функций k-значной логики справедливы равенства*

$$I_{B_P}(F)=\left\lceil \log_2(d(F)+1)\right\rceil,\ \ I_{B_L}(F)=\left\lceil \log_k(d(F)+1)\right\rceil.$$

Далее, стандартным образом определим функции Шеннона немонотонной сложности функций от n переменных и сложности систем из m функций от n переменных над базисом B:

$$I_B(n)=\max_{f\in P_k(n)} I_B(f),\quad I_B(n,m)=\max_{F=\{f_1,\ldots,f_m\}:\, f_j\in P_k(n)} I_B(F).$$

Положим

$$T(k,n)=(k-1)n-\left\lfloor\frac{(k-1)n}{k}\right\rfloor+1=(k-2)n+\left\lceil\frac{n}{k}\right\rceil+1.$$

Легко проверить, что величина $T(k,n)$ ровно на единицу превосходит максимально возможный спад у функций k-значной логики от n переменных.

Теорема 5 [3, 20]. *При любых n и m, $n\ge1$, $m\ge2$, для функций Шеннона сложности реализации функций k-значной логики в базисах B_P и B_L справедливы равенства*

$$I_{B_P}(n)=\left\lceil \log_2 T(k,n)\right\rceil,\ \ I_{B_P}(n,m)=\left\lceil \log_2((k-1)n+1)\right\rceil;$$
$$I_{B_L}(n)=\left\lceil \log_k T(k,n)\right\rceil,\ \ I_{B_L}(n,m)=\left\lceil \log_k((k-1)n+1)\right\rceil.$$

Сложность в бесконечных базисах B_P и B_L

Теперь перейдем к новой постановке, в которой мерой качества схем является сложность схем в ее классическом варианте, когда под сложностью понимается общее число элементов схемы (см., например, [9]). При отказе от «бесплатности» использования в схеме монотонных элементов задача о немонотонной сложности функций k-значной логики ($k\geq 2$) превращается в задачу об обычной сложности. Для сложности (как количества всех элементов) в базисе B схемы S и функции f будем использовать стандартные обозначения $L_B(S)$ и $L_B(f)$, соответственно. Обычным образом вводится и функция Шеннона: $L_B(n)=\max L_B(f)$ где максимум берется по всем функциям k-значной логики f от n переменных.

Рассмотрим тесно связанную с исходной задачей о немонотонной сложности задачу о сложности реализации функций k-значной логики в базисах B_P и B_L. Принципиальной особенностью задач изучения величин $L_{B_P}(f)$, $L_{B_L}(f)$, $L_{B_P}(n)$ и $L_{B_L}(n)$ является бесконечность базисов B_P и B_L.

Справедливость естественной гипотезы о том, что величина $L_{B_L}(f)$ растет асимптотически как $2\lceil \log_k(d(f)+1)\rceil$, доказана в 2016 г.

Теорема 6 [2]. *Для любой функции k-значной логики f справедливы неравенства* $2\lceil \log_k(d(f)+1)\rceil-1\leq L_{B_L}(f)\leq 2\lceil \log_k(d(f)+1)\rceil+1.$

Точное значение функции Шеннона $L_{B_L}(n)$ установлено в 2017 г.

Обозначим через R_k множество натуральных чисел n, не делящихся на k и удовлетворяющих условию: число $T(k,n)$-1 является степенью числа k.

Теорема 7. *При всех достаточно больших значениях n для функции Шеннона сложности реализации функций k-значной логики* ($k\geq 2$) *в базисе* B_L *верно равенство*

$$L_{B_L}(n)=\begin{cases}2\lceil \log_k T(k,n)\rceil, & \text{если } n\in R_k;\\ 2\lceil \log_k T(k,n)\rceil+1, & \text{если } n\in \square\ ,\quad R_{\mathrm{k}}.\end{cases}$$

Частный случай (при $k = 2$) теоремы 7 содержится в [4].

Переходя к базису B_P, для произвольного натурального n положим

$$\tau(n)=\begin{cases}1, & \text{если } 3^r<n\leq 4\times 3^{r-1} \text{ для некоторого целого } r;\\ 2, & \text{если } 4\times 3^{r-1}<n\leq 2\times 3^r \text{ для некоторого целого } r;\\ 3, & \text{если } 2\times 3^r<n\leq 3\times 3^r \text{ для некоторого целого } r.\end{cases}$$

В 2017 г. для базиса B_P с точностью до единицы установлено значение сложности реализации произвольной функции k-значной логики ($k\geq 3$), а также найдено точное значение соответствующей функции Шеннона.

Теорема 8 [4, 8]. *При* $k\geq 3$ *для любой функции k-значной логики f, удовлетворяющей условию* $d(f)\geq 2$, *справедливы неравенства*

$$L_{B_P}(f)\geq 3\left(\lceil \log_3(d(f)+1)\rceil-1\right)+\tau(d(f)+1),$$

$$L_{B_P}(f)\leq 3\left(\lceil \log_3(d(f)+1)\rceil-1\right)+\tau(d(f)+1)+1.$$

Теорема 9 [4, 8]. *При $k\geq 3$ для любого натурального $n\geq 4$ для функции Шеннона сложности реализации функций k-значной логики в базисе B_P справедливо равенство* $L_{B_P}(n)=3\left(\lceil \log_3 T(k,n)\rceil -1\right)+\tau(T(k,n))+1.$

Отметим, что для функции k-значной логики $\xi_n(x_1,\ldots,x_n)=(x_1+\ldots+x_n+1)(k-1) \pmod k$ от n переменных, имеющей при фиксированных значениях k и n максимально возможный спад, в условиях теоремы 9 верно равенство $L_{B_P}(\xi_n)=L_{B_P}(n)$.

Список литературы

1. *Кочергин В. В., Михайлович А. В. О сложности схем в базисах, содержащих монотонные элементы с нулевыми весами // Прикладная дискретная математика. 2015. № 4 (30). С. 24–31.*
2. *Кочергин В. В., Михайлович А. В. О немонотонной сложности функций k-значной логики // Материалы XII Международного семинара «Дискретная математика и ее приложения» имени академика О. Б. Лупанова (Москва, МГУ, 20–25 июня 2016 г.). М.: Изд-во мех-мат ф-та МГУ, 2016. С. 142–145.*
3. *Кочергин В. В., Михайлович А. В. О минимальном числе отрицаний при реализации систем функций многозначной логики // Дискретная математика. 2016. Т 28, вып. 4. С. 80–90.*
4. *Кочергин В. В., Михайлович А. В. Поведение функции Шеннона сложности функций многозначной логики в одном бесконечном базисе // Проблемы теоретической кибернетики. Материалы XVIII Международной конференции (Пенза, 19–23 июня 2017 г.). М: МАКС Пресс, 2017. С. 142–144.*
5. *Кочергин В. В., Михайлович А. В. Оценки немонотонной сложности логических схем // Синтаксис и семантика логических систем: Материалы 5-й Российской школы-семинара (Улан-Удэ, 8–12 августа 2017 г.). Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2017. С. 48–52.*
6. *Кочергин В. В., Михайлович А. В. О немонотонной сложности булевых функций // Математика в современном мире. Международная конференция, посвященная 60-летию Института математики им. С. Л. Соболева (Новосибирск, 14–19 августа 2017 г.): Тезисы докладов. Новосибирск: Изд-во ИМ СО РАН им. С. Л. Соболева, 2017.*
7. *Кочергин В. В., Михайлович А. В. Точное значение немонотонной сложности булевых функций // Математические заметки. В печати.*
8. *Кочергин В. В., Михайлович А. В. О сложности функций многозначной логики в одном бесконечном базисе // Дискретный анализ и исследование операций. В печати.*
9. *Лупанов О. Б. Асимптотические оценки сложности управляющих систем. М.: Изд-во Московского университета, 1984.*
10. *Марков А. А. Об инверсионной сложности систем функций // ДАН СССР. 1957. Т. 116, № 6 С. 917–919.*
11. *Марков А. А. Об инверсионной сложности систем булевых функций // ДАН СССР. 1963. Т. 150, № 3. С. 477–479.*
12. *Нечипорук Э. И. О сложности схем в некоторых базисах, содержащих нетривиальные элементы с нулевыми весами // Проблемы кибернетики, вып. 8. М.: Физматгиз, 1962. С. 123–160.*
13. *Сэвидж Д. Е. Сложность вычислений. М.: Факториал, 1998.*

14. *Blais E., Canonne C. L., Oliveira I. C., Servedio R. A., Tan L.-Y. Learning circuits with few negations // Electronic Colloquium on Computational Complexity. 2014. Report No. 144.*
15. *Fischer M. J. The complexity of negation-limited networks — a brief survey // Springer Lect. Notes in Comput. Sci. 1975. V. 33. P. 71–82.*
16. *Gilbert E. N. Lattice theoretic properties of frontal switching functions // J. Math. Phys. 1954. V. 33. P. 56–67.*
17. *Guo S., Malkin T., Oliveira I. C., Rosen A. The power of negations in cryptography // Lect. Notes in Comput. Sci. 2015. V. 9014. P. 36–65.*
18. *Jukna S. Boolean Function Complexity. Advances and Frontiers. Springer Berlin Heidelberg. 2012. 620 p.*
19. *Kochergin V. V., Mikhailovich A. V. Some extensions of the inversion complexity of Boolean functions // Cornell Univ. Library. arXiv.org>cs> arXiv:1506.04485. 2015.*
20. *Kochergin V. V., Mikhailovich A. V. Inversion complexity of functions of multi-valued logic // Cornell Univ. Library. arXiv.org>cs>arXiv:1510.05942. 2015.*
21. *Kochergin V. V., Mikhailovich A. V. Asymptotics of growth for non-monotone complexity of multi-valued logic function systems. Siberian Electronic Mathematical Reports. To appear.*
22. *Morizumi H. A note on the inversion complexity of Boolean functions in Boolean formulas // Cornell Univ. Library. arXiv.org>cs>arXiv:0811.0699. 2008.*
23. *Morizumi H. Limiting negations in formulas // Lect. Notes in Comput. Sci. 2009. V. 5555, 36th ICALP, Part I. P. 701–712.*
24. *Morizumi H., Suzuki G. Negation-limited inverters of linear size // IEICE Transactions on Information and Systems. 2011. V. E93-D (2). 257–262.*
25. *Sung S., Tanaka K. Limiting negations in bounded-depth circuits: an extension of Markovs theorem // Lect. Notes in Comput. Sci. 2003. V.2906. P.108–116.*
26. *Tanaka K., Nishino T., Beals R. Negation-limited circuit complexity of symmetric functions // Inf. Proc. Lett. 1996. V. 59 (5). P. 273–279.*

УДК 519.7
ББК 22

О НАПРАВЛЕНИЯХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДИСКРЕТНОМУ АНАЛИЗУ В ИНСТИТУТЕ МАТЕМАТИКИ СО РАН[1]

© ***А.А. Евдокимов***, *Институт математики СО РАН им. С.Л. Соболева, Новосибирский государственный университет (г. Новосибирск, Россия)*

ON DIRECTIONS OF RESEARCH ON DISCRETE ANALYSIS IN THE INSTITUTE OF MATHEMATICS OF THE SB RAS

© ***A.A. Evdokimov***, *Institute of Mathematics SB RAS S.Soboleva, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russia)*

Статья написана по материалам пленарного доклада на XVIII-ой Международной конференции «Проблемы теоретической кибернетики», (Пенза, июнь, 2017). В ней мы обсуждаем

[1] *Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РАН 0314-2015-0011.*

направления исследований, текущее состояние и некоторые результаты, полученные в Институте математики СО РАН по дискретному анализу. Эта статья может рассматриваться как краткий обзор наших результатов по указанным в ней направлениям исследований.

Ключевые слова: дискретный анализ, булевы функции, n-мерный куб, вложения, коды, символьные последовательности, криптография, комбинаторика, бент-функция, генные сети.

The article is written on the basis of the plenary talk at the XVIII International Conference "Problems of Theoretical Cybernetics", (Penza, June, 2017). In this paper we discuss the current state of research and the results obtained at the Institute of Mathematics SB RAS on discrete analysis. This article can be regarded as a brief review of some our results for the areas of research indicated in it.

Key words**:** discrete analysis, Boolean functions, n-dimensional cube, embeddings, codes, character sequences, cryptography, combinatorics, bent function, gene networks

E-mail: evdok@math.nsc.ru

В этом году Институт математики СО РАН им. С.Л.Соболева отмечает своё 60-летие. Этому событию была посвящена Международная конференция «Математика в современном мире» (Новосибирск, 14-19 августа 2017г.), а также XVIII Международная конференция «Проблемы теоретической кибернетики» на базе Пензенского государственного технологического университета (Пенза, 19-23 июня, 2017г.).

Тематика теоретических и прикладных исследований Института математики СО РАН им. С.Л. Соболева складывалась и развивалась под влиянием задач кибернетики, перспектив создания вычислительной техники и работ по заказам МО СССР. Основной круг математических вопросов и задач общей направленности был очерчен в ряде публикаций А. А. Ляпунова и С. В. Яблонского в нескольких сборниках «Проблемы кибернетики» в начале 60-х годов [1].

Большое значение для дальнейших исследований по направлению «Дискретный анализ» имело всестороннее изучение дискретных оптимизационных задач минимизации булевых функций, особенно формульного представления булевых функций в виде дизъюнктивных нормальных форм. Интерпретируемые как задачи покрытия заданного множества вершин *n*-мерного гиперкуба его подкубами, они заложили основу всестороннего исследования геометрии, комбинаторики и алгебраической структуры *n*-мерных гиперкубов. Обозначились новые связи с задачами теории кодирования, комбинаторными конфигурациями, алгоритмическими вопросами представления и вычисления дискретных функций и их сложности, общими вопросами теории сложности и дискретной оптимизации.

Новые математические задачи возникли и в связи с реализацией в компьютерах вычислительных систем с архитектурой, в которой информационное взаимодействие микропроцессоров определяется их соединением в структуру n-мерного булева куба (микропроцессоры расположены в вершинах гиперкуба или близкой к ней структуре n-мерного тора). Естественно возникают вопросы обмена информацией, распараллеливания вычислений и целый ряд других вопросов для сетей с такой структурой, а в более широком плане, это вопросы отображения структур данных решаемых задач на архитектуру вычислителя, которая позволяет удобно и быстро работать с этими данными.

Направления исследований. Выделим основные направления исследований, хотя это разбиение, конечно, в значительной степени условно, поскольку исследуемые объекты, задачи и методы тесно взаимосвязаны. В работе по представленным направлениям участвуют коллективы двух лабораторий Института математики СО РАН: дискретного анализа (зав. лаб. А.А. Евдокимов) и дискретного анализа и алгебраической комбинаторики (зав лаб. С.В. Августинович).

A) Дискретные метрические пространства, булевы функции и графы. Геометрия и комбинаторика n-мерного куба. Кодирование структурированной информации.

B) Существование, построение и свойства кодов, дистанционно регулярных и совершенных структур, квазигрупп конечных порядков и других комбинаторных конфигураций. Поиск подходов к их классификации.

C) Комбинаторика слов и символьных последовательностей. Проблема полноты множества слов. Информационные свойства генетических текстов.

D) Криптография и криптоанализ.

E) Задачи анализа, синтеза и сложности дискретных функций, включая модели вычисления булевых функций и дискретные модели функционирования генных сетей.

В каждом из перечисленных направлений получены сильные результаты, которые послужили в определённом смысле базой дальнейших исследований в этих направлениях в нашей стране и за рубежом, или оказали значительное влияние на дальнейшее развитие этих областей дискретной математики [2-5]. Это задачи исследования сложности булевых функций для различных моделей их представления и вычисления, теория кодирования, комбинаторика слов, анализ функций на дискретных метрических пространствах, изучение свойств «типичных» дискретных объектов, общая теория сложности. Методы исследования помехоустойчивых кодов и построения сложных булевых функций заложили основы изучения комбинаторных объектов, исследуемых в направлениях B и D. Спектр изучаемых объектов и задач, конечно, значительно расширился. Подчеркнём, что наши результаты, подходы и методы решения многих задач, в том числе и уровня проблем, являются пионерскими. Они широко известны российским и зарубежным специалистам, работающим в области дискретной математики и математической кибернетики (обзоры [4,5,10,15], публикации [12,13,16,19]).

Отметим публикации А.Д. Коршунова [5] по задачам, относящимся ко всем из пяти направлений. Им были найдены асимптотические формулы для мощности различных классов дискретных объектов: автоматов, графов, некоторых замкнутых классов булевых функций. Хорошо известен результат А. Д. Коршунова по нахождению асимптотики числа монотонных булевых функций, результат А. А. Евдокимова по известной комбинаторной проблеме «Snake-in-the-box» коды, результаты Ю.Л.Васильева, А.А. Сапоженко, В.В. Глаголева, А.Д. Коршунова по метрическим свойствам булевых функций, результаты по задачам теории помехоустойчивого кодирования и теории графов. Отметим большое влияние на развитие исследований по совершенным кодам результата Ю. Л. Васильева о существовании негрупповых плотно упакованных кодов [8]. В обзоре приведена и известная задача о соотношении классов алгоритмической сложности P и NP.

О вложениях дискретных метрических пространств и графов.

Базой рассмотрения общих вопросов вложения явился целый ряд результатов решения конкретных задач вложения и кодирования структурированной информации. В частности, это ставшие уже классическими задачи вложения графов в гиперкубы, задачи изучения свойств и построения помехоустойчивых кодов, существования в гиперкубе гамильтоновых циклов (кодов Грея) с различными ограничениями, «Snake in the box problem», вложения в гиперкубы целочисленных решёток, деревьев, графов вычислительных структур [6,12]. Эти задачи вложения можно и полезно

рассматривать как такие кодирования объектов рассматриваемого множества, которые сохраняют в образе-коде определённые структурные свойства кодируемых объектов (структурированное кодирование). При таком подходе большое значение имеет универсальность *n*-мерного куба, как множества слов длины n, которое может быть наделено различного типа структурами геометрического, алгебраического, порядкового или метрического типа: граф, частично упорядоченное множество, абелева группа, метрическое пространство с метрикой Хемминга, метрикой тора или другими метриками.

Классы отображений, определяющих вложения, это изометрические или локально изометрические отображения, вложения «с растяжением», параметрическое семейство отображений ограниченного искажения, дискретный аналог гомеоморфных вложений. Последнее предполагает введение аналога непрерывности отображения для дискретного случая, когда отображение «близкие точки метрического пространства не разрывает, а далёкие точки не переводит в близкие». Определение класса отображений, сохраняющих близость и отделимость элементов, впервые введено в работе [6], и определено параметрическое семейство отображений ограниченного искажения [7]. Варьируя параметры, получаем различные классы отображений, определяющих тип вложения дискретных метрических пространств.

Отметим, что структурированное кодирование, предполагая сохранение отображением различного типа свойств, позволяет распознавать и корректировать «ошибки» в образе, анализируя выполнение или невыполнение сохраняемых отображением свойств.

Другой прикладной аспект такого подхода состоит в полном или частичном (например, локально изометрическое кодирование) воспроизведении в кодах структуры исходного множества. Это даёт возможность удобной и быстрой работы с элементами множества уже в их машинных кодах с использованием операций, взаимосвязанных с архитектурой компьютера. В первой части публикации доклада [4] и в работе [7] подробно сказано о результатах по задачам вложения и кодирования структурированной информации.

Цикл работ, возникших при исследовании вложений дискретных метрических пространств и графов, выполнен Т.И. Федоряевой. Ею изучен класс графов, удовлетворяющих свойству продолжения метрики, и получены интересные результаты по проблеме, которую мы называем «раздувающиеся шары в графе». Основной вопрос, на который пока не удалось получить исчерпывающий ответ, состоит в описании всех возможных векторов разнообразия шаров n-вершинных графов (i-я компонента вектора равна числу различных шаров радиуса i, содержащихся в графе) [20].

Коды и комбинаторные конфигурации. Один из главных объектов изучения теории кодирования — помехоустойчивые коды. В нашем коллективе особенно далеко продвинуты исследования свойств, методов построения и оценок мощности класса совершенных кодов (это плотно упакованные помехоустойчивые коды с расстоянием 3). В более широком контексте исследуются разного типа комбинаторные конфигурации и совершенные «раскраски». Последние — это фактически дискретные функции на булевом или *q*-значном кубе, удовлетворяющие определённым структурным, комбинаторным или метрическим ограничениям.

Рассматриваются вопросы существования таких функций, их построения, изучения определённых свойств, связанных с содержательными задачами

их происхождения, а также вопросы оценки числа функций или комбинаторных конфигураций различных классов.

Уже было сказано, что большое влияние на становление и развитие исследований по совершенным кодам оказал результат Ю.Л. Васильева о существовании негрупповых плотно упакованных кодов [8]. Дальнейшие исследования в этой области показали, что метрическая совершенность кодов (плотная упакованность шаров радиуса 1) в многомерных дискретных пространствах может сочетаться со значительным разнообразием их структурной организации, в определённом смысле «далёкой от совершенства». Нахождение специального типа инвариантных преобразований кодов позволило построить мощный класс совершенных кодов и начать всестороннее исследование их свойств и конструкций [10].

Одной из интригующих нерешённых задач является получение более точных оценок мощности класса совершенных кодов, поскольку пока сохраняется очень большой разрыв между нижними оценками, полученными подсчётом мощности построенных классов кодов, и тривиальными верхними оценками [5].

Широко исследуется и задача поиска подходов к классификации совершенных кодов, которая была недавно решена для размерности кода, равной 15, но оказалось очень трудной задачей.

В последние годы тематика исследований по кодам и различного типа комбинаторным конфигурациям заметно расширилась [10,11]. Рядом авторов получены интересные результаты по исследованию класса транзитивных 1-совершенных кодов. Большой интерес представляют результаты по тестированию совершенных кодов и восстановлению кода по различного типа частичной информации об его строении (С.В. Августинович и А.Ю. Васильева). С.А. Малюгиным рассматривались вопросы о существовании и разнообразии совершенных кодов с расстоянием 3 в булевом кубе счётной размерности. Решён вопрос о мощности множества классов эквивалентности таких кодов. Исследуются аналоги различных других вопросов классической теории кодирования.

Широко известны результаты С.А. Малюгина по несистематическим совершенным кодам и классификации совершенных кодов длины 15 [9]. Решено несколько известных задач о комбинаторных конфигурациях близких к квазигруппам, о латинских кубах, о криптографических булевых функциях. Кротовым Д.С. и Потаповым В.Н. доказаны асимптотические оценки числа n-арных квазигрупп произвольных порядков и получено конструктивное описание n-арных квазигрупп порядка 4.

Комбинаторика слов и символьных последовательностей.

Это наше направление и близкая к нему тема полноты множества слов, называемая иначе задачей об избегании множества слов-запретов, имеют давние корни. Основой явилось решение А.А. Евдокимовым двух задач. Это проблема известного венгерского математика П.Эрдёша о существовании бесконечной символьной последовательности, не содержащей подряд повторяющихся двух отрезков с одинаковым составом букв в них. Вторая задача — нахождение порядка величины максимальной длины «змеи в ящике». Так называется простой путь в булевом *n*-мерном кубе, который не содержит хорд. Эта задача исследовалась и была решена именно в интерпретации слов с запретами [12].

За последние лет 30 в дискретной математике сформировался и продолжает интенсивно развиваться раздел комбинаторики, который принято называть «Комбинаторика слов» [21]. Слова или цепочки символов (strings of symbols) являются

объектом исследования в различных разделах дискретной математики: теории программирования, формальных языках, теории кодирования, математических основаниях криптографии. Всё шире применяются различные математические методы в задачах анализа, хранения и обработки генетических текстов, изучении структуры и свойств химических соединений органического происхождения, задачах распознавания и кодирования образов и многих других.

Одна из основных целей исследований в молекулярной генетике и биоинформатике состоит во вскрытии взаимосвязей между «линейной» организацией «первичных генетических текстов» и функционированием последующих более «сложно» организованных белковых структур. Полезным подходом к изучению этих задач является исследование различного типа естественных математических структур, определяемых на множествах фрагментов-подслов «первичных» структур, например, символьных последовательностей или генетических ДНК последовательностях. Одной из таких структур являются графы перекрытия слов, называемые ещё графами де Брейна (de Bruijn graph), которые рассматривались нами начиная с 80-х годов в связи с различными задачами дискретного анализа [4, 16].

Криптографические свойства булевых функций. Эта область исследования очень популярна и важна для приложений, в частности, в задачах, возникающих в области шифрования и защиты информации от атак по каналам связи, цифровой сотовой связи, возможностей дешифровки сообщений и др.

С 2011г. началось интенсивное исследование «криптографических» булевых функций: бент-функций, алгебраически иммунных булевых функций, почти совершенно нелинейных (APN) функций и ряд других. Булевы функции из этих классов используются в реально существующих системах кодирования и защиты информации и потому особенно интенсивно изучаются работающими в области криптографии математиками во всём мире. Одной из основных задач в этой области является проблема достаточно полного структурного описания класса булевых функций, удовлетворяющих метрическому условию наибольшей удалённости от класса всех аффинных булевых функций на максимально возможное расстояние Хэмминга. Это свойство сильной нелинейности и определяет класс бент-функций. В [13] содержится много результатов, включая и собственные результаты автора, описаны связи бент-функций с матрицами Адамара, разностными множествами, сильно регулярными графами и другими дискретными объектами. Рассматриваются метрические свойства пространства бент-функций, важные для проблемы их классификации.

Несмотря на большое число результатов по бент-функциям, в этой области ещё много нерешенных задач, в том числе и уровня проблем. Это гипотеза о том, что любая булева функция степени не выше n/2 представима в виде суммы двух бент-функций. Это вопрос об описании класса APN-функций (почти совершенно нелинейных функций), который интенсивно исследуется специалистами в настоящее время. Это важная проблема нахождения числа бент-функций (или хотя бы асимптотики логарифма мощности этого класса). Проводя сравнение с другими близкими перечислительными задачами подсчёта мощности классов «сложных» булевых функций и кодов можно ожидать, что задача окажется трудной.

Дискретные математические модели функционирования генных сетей активно изучаются в мире, особенно в последние годы. Анализу их функционирования посвящено много публикаций [16]. Наша работа в этой области нача-

лась со знакомства с задачами по совместному с Институтом цитологии и генетики проекту «Генные сети: теоретический анализ, компьютерное моделирование и экспериментальное конструирование». Тема оказалась интересной и близкой к известным задачам анализа и синтеза управляющих систем в математической кибернетике. В наших первых публикациях [22] исследовались два класса дискретных моделей генных сетей: am-сети и генетические сети.

За прошедшие 10 лет нами получены результаты по выяснению качественной картины динамики функционирования дискретных моделей генных сетей [16,17,]. Наряду с этим рассматривались и алгоритмические вопросы анализа генных сетей используя подходы и методы из дискретного анализа, сводимость задач к решению систем булевых уравнений, методы и технологии символьных SAT-вычислений. Отметим идею описания состояний сети запретами на фрагменты слов, кодирующих эти состояния.

Список литературы

1. *Ляпунов А. А., Яблонский С. В. Теоретические проблемы кибернетики. Сборник Проблемы кибернетики. Выпуск 9. Москва. 1963.*
2. *Дискретная математика и математические вопросы кибернетики. Наука. Главная редакция физико-математической литературы. Москва. 1974.*
3. *Журавлёв Ю. И. О невозможности построения минимальных дизъюнктивных нормальных форм функций алгебры логики в одном классе алгоритмов", Докл. АН СССР, 132:3 (1960), 504–506 http://mi.mathnet.ru/dan23587*
4. *Евдокимов А. А. О некоторых направлениях исследований по дискретному анализу // XIII Международная конференция «Проблемы теоретической кибернетики». Публикации пленарных докладов. Казань. 2004. С. 49–58.*
5. *А. Д. Коршунов, "Некоторые нерешенные задачи дискретной математики и математической кибернетики", УМН, 64:5(389) (2009), 3–20; Russian Math. Surveys, 64:5 (2009), 787–803.*
6. *Евдокимов А. А. Метрические свойства вложений и коды, сохраняющие расстояния // Труды АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т математики. 1988. Т.10. С. 116–132.*
7. *Евдокимов А. А. Вложения в классе параметрических отображений ограниченного искажения // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия Физико-математические науки. 2009. Том 151, № 2. С.72–80*
8. *Васильев Ю. Л. О негрупповых плотно упакованных кодах // Проблемы кибернетики. М.: Физматгиз, 1962. Вып. 8. С. 337–339.*
9. *Малюгин С. А. Метод орбит в теории совершенных кодов. XIII Международная конференция «Проблемы теоретической кибернетики». Публикации пленарных докладов. 2004. Казань. С 76–84.*
10. *Соловьёва Ф. И. Обзор по совершенным кодам. Сборник «Математические вопросы кибернетики». 2013. Москва. Физматлит. С. 5–34.*
11. *Потапов В. Н. N-арные квазигруппы конечного порядка. XVI Международная конференция «Проблемы теоретической кибернетики». Пленарный доклад. Нижний Новгород. 2011.*
12. *Евдокимов А. А. Цепные коды и Snake-in-the-Box Problem. // Учён. Зап. Казанского ун-та. Физ-мат. науки, 156, № 3, Изд-во Казанского ун-та, Казань, 2014, 55–65.*
13. *Tokareva N. Bent functions: results and applications to cryptography, Acad. Press. Elsevier. 2016. 220 pages*

14. *Kolomeec N. A. A graph of minimal distances between bent functions, Матем. вопр. криптогр., 7:2 (2016), 103–110.*
15. *Коршунов А. Д., Сложность вычислений булевых функций, УМН, 67:1(403) (2011) 97–168.*
16. *В. А. Лихошвай, В. П. Голубятников, Г.В. Демиденко, А. А. Евдокимов, И. И. Матвеева, С. И. Фадеев. Теория генных сетей // в монографии Системная компьютерная биология, Новосибирск. Изд-во СО РАН, 2008. С. 395–480.*
17. *Евдокимов А. А. Динамические системы дискретных моделей регуляторных контуров генных сетей: анализ и сложность функционирования, восстановление структуры. Пленарный доклад на XI Международном семинаре «Дискретная математика и её приложения», посвящённом 80-летию со дня рождения академика О.Б. Лупанова. МГУ, 2012.*
18. *Evdokimov A. A., Kochemazov S. E., Otpushchennikov I. V., and Semenov A. A. Study of Discrete Automaton Models of Gene Networks of Nonregular Structure Using Symbolic Calculations // Journal of Applied and Industrial Mathematics, 8:3 (2014), 307–316.*
19. *Кротов Д. С. Совершенные комбинаторные структуры. Конференция профессоров РАН по Отделению математических наук РАН. 2016. (Video) http://www.mathnet.ru/php/presentation.phtml? option_lang=rus&presentid=14349*
20. *Евдокимов А.А., Федоряева Т. И. О проблеме характеризации векторов разнообразия шаров. // Дискрет. анализ и исслед. операций, 2014. Т.21, №1. С.44–53.*
21. *Berstel J., Karhumäki J. Combinatorics on words – A tutorial, Bull. EATCS 79 (2003), 178–229.*
22. *Евдокимов А. А., Григоренко Е. Д., Лихошвай В. А., Лобарева И. А. Неподвижные точки и циклы автоматных отображений, моделирующих функционирование генных сетей // Вестник Томского госуниверситета. №14. Приложение. 2005, 206–212.*

УДК 519.7
ББК 22

О РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ О СУММЕ ПОДМНОЖЕСТВ МЕТОДОМ ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ [1]

© ***Р.М. Колпаков***, *МГУ им М.В. Ломоносова, Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН* (*г. Москва, Россия*)
© ***М.А. Посыпкин***, *Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН* (*г. Москва, Россия*)

ON SOLVING OF THE SUBSET SUM PROBLEM BY THE BRANCH AND BOUND METHOD

© ***R.M. Kolpakov***, *Lomonosov Moscow State University, Dorodnicyn Computing Centre, FRC CSC RAS (Moscow, Russia)*
© ***M.A. Posypkin***, *Dorodnicyn Computing Centre, FRC CSC RAS (Moscow, Russia)*

[1] *Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-07-03102).*

Статья содержит обзор результатов, связанных с оценкой алгоритмической сложности решения задачи о сумме подмножеств различными вариантами метода ветвей и границ.
Ключевые слова: задача о сумме подмножеств, метод ветвей и границ, алгоритмическая сложность.

The article is a review of results related to the complexity bounds on solving of the subset sum problem by some variants of the branch and bound method.
Key words: subset sum problem, branch and bound method, algorithmic complexity.
E-mail: foroman@mail.ru; mposypkin@gmail.com.

Рассматривается *задача о сумме подмножеств*, которая является частным случаем задачи о булевом ранце с одним ограничением, в котором веса и стоимости предметов совпадают. Формально задача формулируется следующим образом

$$\begin{aligned} &\text{maximize } f(\tilde{x}) = \sum_{i \in N} x_i w_i, \\ &\text{subject to } f(\tilde{x}) = \sum_{i \in N} x_i w_i \le C, \\ &x_i \in \{0,1\}, i \in N = \{1,2,...,n\}. \end{aligned} \tag{1}$$

Содержательно задача о сумме подмножеств состоит в нахождении совокупности номеров предметов $I \subseteq N$, сумма $\sum_{i \in I} w_i$ весов которых максимально близка к границе C вместимости ранца, но не превосходит ее. Для решения данной задачи предложено много методов, обзор которых содержится, например, в монографиях [1, 2].

Классическим подходом к решению задачи о сумме подмножеств является метод ветвей и границ (МВГ), суть которого заключается в разбиении исходной задачи на подзадачи меньшей размерности. Подзадачей задачи P о сумме подмножеств называется задача P', получаемая из задачи P фиксацией значений θ_i некоторых переменных x_i:

$$\begin{aligned} &\text{maximize } f(\tilde{x}) = \sum_{i \in N} x_i w_i, \\ &\text{subject to } f(\tilde{x}) = \sum_{i \in N} x_i w_i \le C, \\ &x_i = \theta_i, i \in J, \theta_i \in \{0,1\}, \\ &x_i \in \{0,1\}, i \in N \setminus J. \end{aligned} \tag{2}$$

Переменные x_i для $i \in J$ называются *фиксированными* переменными, а переменные x_i для $i \in N \setminus J$ - *свободными* переменными подзадачи P'. Отметим, что подзадача P' также представляет собой задачу о сумме подмножеств от своих свободных переменных с границей $C' = C - \sum_{i \in J} \theta_i w_i$.

Пусть x_j - некоторая свободная переменная подзадачи P'. Присваиванием этой переменной значений 0 и 1 соответственно из подзадачи P' можно получить новые подзадачи P'_0 и P'_1 с множеством $J \cup \{j\}$ индексов фиксированных переменных. Данная процедура получения новых подзадач меньшей

размерности называется *декомпозицией* подзадачи P', а переменная x_j - *переменной ветвления* для этой декомпозиции.

В процессе решения задачи методом ветвей и границ подзадачи, удовлетворяющие определенным условиям, исключаются из дальнейшего рассмотрения. Такие условия называются *условиями отсева*. Подзадача P' удовлетворяет условию **C0** *отрицательного отсева*, если $C' = C - \sum_{i \in J} \theta_i w_i < 0$. Очевидно, что подзадача, удовлетворяющая условию **C0**, не имеет решения. Подзадача P' удовлетворяет условию **C1** *положительного отсева*, если $\sum_{i \in N \setminus J} w_i \le C - \sum_{i \in J} \theta_i w_i$. Подзадача P', удовлетворяющая условию **C1**, имеет очевидное оптимальное решение $x_i = 1$ для $i \in N \setminus J$.

Классический метод ветвей и границ для задачи о сумме подмножеств состоит в выполнении следующей процедуры (в процессе выполнения данной процедуры поддерживаются список Q подзадач-кандидатов, подлежащих дальнейшему рассмотрению, и текущее рекордное решение задачи $\tilde{x}^r$).

1. Инициализировать список Q, поместив в него исходную задачу.
2. Пока список Q непуст, выбрать и удалить из него некоторую подзадачу-кандидат P.
3. Если P удовлетворяет условию **C0**, вернуться к шагу 2.
4. Если P удовлетворяет условию **C1**, вычислить для P оптимальное решение (если значение целевой функции $f(\tilde{x})$ на этом решении больше текущего рекордного значения, обновить текущее рекордное решение $\tilde{x}^r$) и вернуться к шагу 2.
5. Произвести декомпозицию подзадачи P на две подзадачи, добавить эти подзадачи в список Q, и вернуться к шагу 2.

Процесс решения задачи о сумме подмножеств МВГ удобно представить в виде корневого дерева, называемого *деревом ветвлений*. Вершинами данного дерева являются подзадачи, рассмотренные в процессе решения задачи методом ветвей и границ. Корневой вершиной является исходная задача. Подзадача, подвергнутая в процессе решения декомпозиции, соединена в дереве ребрами с подзадачами, полученными в результате данной декомпозиции. Задачи, удовлетворяющие условиям отсева, являются в дереве ветвлений концевыми вершинами.

Под сложностью $L(P)$ решения задачи P о сумме подмножеств МВГ понимается общее число просмотренных в процессе решения подзадач-кандидатов, т.е. число вершин в дереве ветвлений для данного решения. Приведенной сложностью $\hat{L}(P)$ решения задачи P о сумме подмножеств МВГ называется общее число просмотренных в процессе решения подзадач-кандидатов, удовлетворяющих условиям отсева, т.е. число концевых вершин в дереве ветвлений для данного решения. Заметим, что дерево ветвлений для МВГ является бинарным, т.е. число вершин в этом дереве составляет $2K-1$, где K - число концевых вершин дерева. Таким образом, для любого решения

задачи P выполняется $L(P)=2\hat{L}(P)-1$, тем самым без ограничения общности вместо сложности $L(P)$ удобнее рассматривать приведенную сложность $\hat{L}(P)$.

Задачу о сумме подмножеств будем называть *невырожденной*, если ни на каком наборе значений переменных $x_1,...,x_n$ целевая функция $f(\tilde{x})$ не достигает значения C. Заметим, что для решения невырожденной задачи о сумме подмножеств МВГ необходимо просмотреть все содержащиеся в списке Q подзадачи-кандидаты, тем самым сложность решения невырожденной задачи о сумме подмножеств МВГ не зависит от очередности выбора подзадач из списка Q. Таким образом, для изучения максимальной сложности решения задачи о сумме подмножеств МВГ естественно ограничиться случаем невырожденных задач.

Нетрудно заметить, что для любого решения задачи P о сумме подмножеств дерево ветвлений содержит не более 2^n концевых вершин, тем самым $\hat{L}(P)\le 2^n$ и $L(P)\le 2^{n+1}-1$. Данная оценка достигается на задаче $P_M[n]$ с входными значениями: $w_1=w_2=...=w_{n-1}=2$, $w_n=2n$, $C=2n-1$. Нетрудно проверить, что если в процессе решения для любой декомпозиции в качестве переменной ветвления выбирается свободная переменная с наименьшим номером, то $\hat{L}(P_M[n])=2^n$ и $L(P_M[n])=2^{n+1}-1$. С другой стороны, если для декомпозиции исходной задачи $P_M[n]$ в качестве переменной ветвления выбрать переменную x_n, то $\hat{L}(P_M[n])=2$ и $L(P_M[n])=3$. Таким образом, сложность решения задачи о сумме подмножеств МВГ существенно зависит от стратегии выбора переменных ветвления для декомпозиций, осуществляемых на шаге 5 процедуры МВГ. Вместе с тем имеется простой пример задачи $P_\Phi[n]$ с входными данными $w_1=w_2=...=w_n=2$ и $C=2\lfloor n/2\rfloor+1$, сложность решения которой МВГ не зависит от стратегии выбора переменных ветвления. В [3] было показано, что для любой стратегии выбора переменных ветвления выполняется

$$\hat{L}(P_\Phi[n])=\binom{n+1}{\lfloor (n+1)/2\rfloor}\sim\frac{2^{n+1}}{\sqrt{\pi n/2}}.$$

Исходя из примера задачи $P_M[n]$, естественно рассмотреть *мажоритарную* стратегию выбора переменных ветвления, при которой в качестве переменной ветвления всегда выбирается свободная переменная x_i с наибольшим весом w_i (без ограничения общности можно полагать, что переменные упорядочены в порядке невозрастания их весов: $w_1\ge w_2\ge...\ge w_n$, в этом случае в качестве переменной ветвления всегда выбирается свободная переменная с наименьшим номером). Мы называем МВГ с данной стратегией выбора переменных ветвления *мажоритарным* МВГ. В [4] получено, что для любой задачи P о сумме подмножеств приведенная сложность $\hat{L}^M(P)$ решения задачи P

мажоритарным МВГ не превосходит $\binom{n+1}{\lfloor (n+1)/2 \rfloor} \sim \frac{2^{n+1}}{\sqrt{\pi n/2}}$, тем самым задача $P_{\Phi}[n]$ имеет максимальную сложность решения для мажоритарного МВГ.

В [5] показано, что для любой невырожденной задачи P сложность $\hat{L}^M(P)$ является минимальной по сравнению со сложностью решения задачи P МВГ с произвольной стратегией выбора переменных, тем самым мажоритарный МВГ является оптимальным для любой невырожденной задачи о сумме подмножеств. Таким образом, сложность $\hat{L}^M(P)$ можно рассматривать как «универсальную» сложность решения задачи P классическим вариантом МВГ.

Отметим, что значение $\hat{L}^M(P)$ имеет также естественное альтернативное определение следующего вида. Пусть P - произвольная задача о сумме подмножеств. Для любого двоичного набора $\tilde{\sigma} = (\sigma_1, \sigma_2, \ldots, \sigma_n) \in \{0,1\}^n$ положим $f(\tilde{\sigma}) = \sum_{i=1}^{n} \sigma_i w_i$. Обозначим через U_P множество наборов $\tilde{\sigma}$ из $\{0,1\}^n$ таких, что $f(\tilde{\sigma}) > C$, и через D_p множество наборов $\tilde{\sigma}$ из $\{0,1\}^n$ таких, что $f(\tilde{\sigma}) \le C$. На множестве двоичных наборов рассматривается стандартное отношение частичного порядка: для двух наборов $\tilde{\sigma}' = (\sigma_1', \sigma_2', \ldots, \sigma_n'), \tilde{\sigma}'' = (\sigma_1'', \sigma_2'', \ldots, \sigma_n'')$ выполняется $\tilde{\sigma}' \le \tilde{\sigma}''$, если $\sigma_i' \le \sigma_i''$ для $i = 1, 2, \ldots, n$. Для данного отношения частичного порядка обозначим через $\underline{U}_P$ множество всех минимальных наборов из U_P, и через $\bar{D}_p$ множество всех максимальных наборов из D_p. В [5] показано, что для любой невырожденной задачи P о сумме подмножеств $\hat{L}^M(P) = |\underline{U}_P| + |\bar{D}_p|$.

Пусть P' - подзадача задачи о сумме подмножеств, не удовлетворяющая условиям отсева **C0** и **C1**, тем самым $0 \le C' = C - \sum_{i \in J} \theta_i w_i < \sum_{i \in N \setminus J} w_i$. В таком случае найдется переменная x_s такая, что $s = \min\{ j \in N \setminus J \mid \sum_{i \in N \setminus J, i \le j} w_i > C' \}$. Переменная x_s называется *дробной* переменной для подзадачи P'. Стратегия выбора переменных ветвления, при которой в качестве переменной ветвления для декомпозиции подзадачи всегда выбирается ее дробная переменная, называется *ветвлением по дробной переменной*. Ветвление по дробной переменной полагается эффективным для решения более общей задачи о ранце [6]. Обозначим через $\hat{L}^Q(P)$ приведенную сложность решения задачи P о сумме подмножеств МВГ с ветвлением по дробной переменной. В [7] показано, что для любого $\varepsilon > 0$ существует задача P такая, что $\hat{L}^Q(P) > \left(\frac{3}{2} - \varepsilon\right)\binom{n+1}{\lfloor (n+1)/2 \rfloor}$, тем самым максимальная приведенная сложность $\hat{L}^Q(n)$ решения задачи о сумме подмножеств МВГ с ветвлением по

дробной переменной не менее, чем в полтора раза асимптотически превышает максимальную приведенную сложность решения этой задачи мажоритарным МВГ. Исходя из компьютерных экспериментов, мы предполагаем, что $\hat{L}^Q(n)$ асимптотически равна $\frac{3}{2}\binom{n+1}{\lfloor (n+1)/2 \rfloor} \sim 3\frac{2^n}{\sqrt{\pi n/2}}$.

Пусть P - некоторая задача о сумме подмножеств такая, что $w_1 \geq w_2 \geq \ldots \geq w_n$. Положим

$$\underline{k} = \max\{k \in N \mid \sum_{i=1}^{k} w_i \leq C\}, \quad \overline{k} = \max\{k \in N \mid \sum_{i=n-k+1}^{n} w_i \leq C\}. \qquad (3)$$

Очевидно, что $\overline{k} \geq \underline{k}$. Обозначим через **C1'** ослабленное условие положительного отсева, выполняющееся в случае $\overline{k} = \underline{k}$. Нетрудно заметить, что задача P, удовлетворяющая условию **C1'**, имеет оптимальное решение: $x_1 = x_2 = \ldots = x_k = 1, \; x_{k+1} = x_{k+2} = \ldots = x_n = 0$, где $k = \overline{k} = \underline{k}.$ Таким образом, любая подзадача задачи о сумме подмножеств, удовлетворяющая условию **C1'**, также может быть исключена из дальнейшего рассмотрения в процессе решения этой задачи. МВГ, в котором вместо условия **C1** используется условие **C1'**, будем называть МВГ *с мощностным отсевом*. Заметим, что для задачи $P_{\Phi}[n]$ имеем $\overline{k} = \underline{k} = \lfloor n/2 \rfloor$, т.е. эта задача удовлетворяет условию **C1'**. Поэтому сложность решения задачи $P_{\Phi}[n]$ МВГ с мощностным отсевом равна 1.

В [8] рассмотрен мажоритарный МВГ с мощностным отсевом, т.е. МВГ с мощностным отсевом и мажоритарной стратегией выбора переменных ветвления. Показано, что максимальная приведенная сложность решения задачи о сумме подмножеств мажоритарным МВГ с мощностным отсевом равна $\binom{n}{\lfloor n/2 \rfloor} \sim \frac{2^n}{\sqrt{\pi n/2}}$, тем самым в наихудшем случае мажоритарный МВГ с мощностным отсевом асимптотически в 2 раза эффективнее, чем мажоритарный МВГ. В качестве примера задачи, имеющей максимальную сложность решения для мажоритарного МВГ с мощностным отсевом, можно рассмотреть задачу $P'_{\Phi}[n]$ с входными данными $w_1 = w_2 = \ldots = w_{n-1} = 3, \quad w_n = 1,$ $C = 3\lfloor (n-1)/2 \rfloor + 2$. Отметим, что, если в качестве переменной ветвления для декомпозиции задачи $P'_{\Phi}[n]$ выбрать переменную x_n, то обе полученные в результате этой декомпозиции задачи удовлетворяют условию **C1'**, т.е. приведенная сложность решения задачи $P'_{\Phi}[n]$ в этом случае равна 2. Таким образом, мажоритарная стратегия выбора переменных ветвления, вообще говоря, не является оптимальной для МВГ с мощностным отсевом. Поэтому интересной открытой проблемой является определение оптимальной стратегии выбора переменных ветвления для МВГ с мощностным отсевом.

Отметим, что МВГ, вообще говоря, не является наиболее эффективным методом для решения задачи о сумме подмножеств. Важным преимуществом МВГ в данном случае является то, что он допускает простое и естественное распараллеливание, что делает МВГ перспективным для решения

задач на многопроцессорных системах. Эффективное распараллеливание решения задач МВГ основывается на сбалансированном разбиении исходной задачи на подзадачи сравнительно одинаковой сложности. Поэтому для эффективного распараллеливания МВГ принципиальное значение имеет проблема точной оценки сложности решения задач, в частности, задачи о сумме подмножеств, МВГ исходя из их входных данных. Для описания результатов в решении этой проблемы введем следующие обозначения. Пусть P - некоторая задача о сумме подмножеств, не удовлетворяющая условиям отсева **C0**, **C1**, при этом $w_1 \geq w_2 \geq \ldots \geq w_n$. Положим

$$\underline{K} = \min\{k \in N \mid \sum_{i=1}^{k} w_i > C\}, \quad \overline{K} = \min\{k \in N \mid \sum_{i=n-k+1}^{n} w_i > C\}. \tag{4}$$

Очевидно, что $\underline{K} = \underline{k} + 1$, $\overline{K} = \overline{k} + 1$ и $\overline{K} \geq \underline{K}$. Положим также

$$k_r = \left\lfloor \frac{f_r - W/2}{w_1} + \frac{n}{2} \right\rfloor, \quad k_m = \left\lfloor \frac{f_m - W/2}{w_1} + \frac{n}{2} \right\rfloor, \tag{5}$$

где $W = \sum_{i=1}^{n} w_i$, f_r - значение целевой функции $f(\tilde{x})$ для некоторого известного априори решения задачи P, f_m - оптимальное значение целевой функции $f(\tilde{x})$. Одной из первых работ в этом направлении исследований является статья [4]. Из результатов этой работы вытекает, что $\hat{L}^M(P) \leq \binom{n+1}{k+1}$, где $k_r \leq k \leq \max(k_r, k_m)$ (недостатком этой оценки является ее зависимость от априори неизвестного значения f_m, однако на практике это значение можно эффективно оценить величиной C). Наиболее эффективные на настоящее время оценки для $\hat{L}^M(P)$ получены в работе [9]:

$$\hat{L}^M(P) \leq \binom{n+1}{\overline{K}}, \quad \text{при } \overline{K} \leq \lfloor n/2 \rfloor + 1; \tag{6}$$

$$\hat{L}^M(P) \leq 1 + \binom{n+1}{\lfloor n/2 \rfloor + 1} - \binom{\overline{K}}{\lfloor n/2 \rfloor + 1}, \quad \text{при } \overline{K} > \lfloor n/2 \rfloor + 1. \tag{7}$$

В [10] исследовалась приведенная сложность $\hat{L}(P)$ решения невырожденной задачи о сумме подмножеств МВГ с произвольной стратегией выбора переменных ветвления, для данной сложности получены следующие оценки:

$$\binom{n+1-\overline{K}+\underline{K}}{\underline{K}} \leq \hat{L}(P) \leq \binom{n+1-\underline{K}+\overline{K}}{\overline{K}}, \tag{8}$$

$$\hat{L}(P) \leq \sum_{i=\lfloor n/2 \rfloor - \lambda + 1}^{\lfloor n/2 \rfloor + \lambda} \binom{n}{i},$$

где $\lambda = \lceil w_1 / w_n \rceil$.

Список литературы

1. Martello S., Toth P. Knapsack Problems. John Wiley & Sons Ltd., 1990. 296 p.
2. Kellerer H., Pfershy U., Pisinger D. Knapsack Problems. Springer Verlag, 2004. 546 p.
3. Финкельштейн Ю.Ю. Приближенные методы и прикладные задачи дискретного программирования. М.: Наука, 1976. 264 с.
4. Гришухин В.П. Эффективность метода ветвей и границ в задачах с булевыми переменными. Исследования по дискретной оптимизации. М.: Наука, 1976. С. 203-230.
5. Колпаков Р.М., Посыпкин М.А. О наилучшем выборе переменной ветвления в задаче о сумме подмножеств. Дискретная математика. М.: Наука, 2017. Т. 29, № 1. С. 51–58.
6. Сигал И.Х., Иванова А.П. Введение в прикладное дискретное программирование. М.: ФИЗМАТЛИТ , 2003. 240 с.
7. Колпаков Р.М., Посыпкин М.А. Асимптотическая оценка сложности метода ветвей и границ с ветвлением по дробной переменной для задачи о ранце. Дискретный анализ и исследование операций. Серия 1. 2008. Т. 15, № 1. С. 58–81.
8. Посыпкин М.А., Колпаков Р.М., Тант Син С.Т. Сложность решения задачи о сумме подмножеств методом ветвей и границ с доминированием и мощностным отсевом. Автоматика и телемеханика. 2017. № 3. С. 96–110.
9. Колпаков Р.М., Посыпкин М.А. Верхняя оценка числа ветвлений для задачи о сумме подмножеств. Математические вопросы кибернетики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. Т. 18. С. 213–226.
10. Колпаков Р.М., Посыпкин М.А. Верхняя и нижняя оценки трудоемкости метода ветвей и границ для задачи о ранце. Дискретная математика. М.: Наука, 2010. Т. 22, № 1. С. 58–73.

АЛГОТИРМЫ, УСТРОЙСТВА И ЭЛЕМЕНТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.382
ББК 34

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПЛИС АРХИТЕКТУРЫ FPGA

© ***И.В. Ушенина***, *Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

CURRENT TRENDS IN FPGA EVOLUTION

© ***I.V. Ushenina***, *Penza State Technological University (Penza, Russia)*

В статье рассматриваются современные направления развития микросхем программируемой логики – ПЛИС архитектуры FPGA. Среди рассмотренных направлений – совершенствование технологий производства, появление программируемых систем на кристалле, изменение подходов к проектированию устройств на ПЛИС.

Ключевые слова: ПЛИС FPGA, finFET-транзисторы, 3D-ПЛИС, программируемые системы на кристалле

This paper considers the current trends in FPGA evolution. Among these trends are: improvements in FPGA manufacturing technologies, emergence of programmable systems on chip, changes in approaches to development of FPGA-based devices.

Key words: FPGA, finFET transistors, 3D-FPGAs, programmable systems on chip

E-mail: ivl23@yandex.ru

С момента появления первых ПЛИС архитектуры FPGA прошло более тридцати лет. За это время FPGA прошли несколько этапов эволюции, и превратились из альтернативы базовым матричным кристаллам в многофункциональную платформу для реализации высокопроизводительных цифровых устройств. Анализ продукции крупнейших производителей FPGA – компаний Xilinx и Altera (последняя в настоящее время является структурным подразделением фирмы Intel), а также отечественных и зарубежных публикаций, посвященных современному уровню развития FPGA, позволяет заключить, что в настоящее время FPGA проходят очередной этап эволюции. На этом этапе FPGA и средства проектирования устройств на их основе претерпевают больше качественных изменений, чем обычно. Настоящая работа является кратким обзором современных направлений развития FPGA.

Направление 1. Переход от планарных транзисторов к транзисторам с трёхмерной структурой в связи с потребностью в снижении технологических норм производства FPGA. Планарные МОП-транзисторы (рисунок 1) использовались в FPGA с технологическими нормами до 28 нм включительно: у Xilinx это FPGA 7 серии, у Altera – Stratix V. Снижение технологических норм приводит к уменьшению ширины канала и ухудшает характеристики планарного транзистора: ограничиваются возможности управления током в канале, возрастают токи утечки.

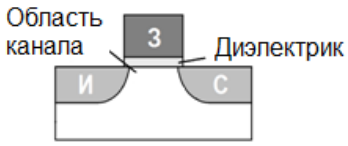


Рисунок 1 – Структура планарного МОП-транзистора. З – затвор, И – исток, С – сток

В транзисторах с трёхмерной структурой эффективная ширина канала увеличивается благодаря тому, что затвор, обхватывая кремниевую подложку, образует канал с трёх сторон (рисунок 2). Область соприкосновения затвора и подложки напоминает по форме плавник (fin), отсюда и название транзисторов – finFET (fin field effect transistors).

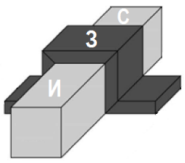


Рисунок 2 – Структура трёхмерного МОП-транзистора (finFET)

Увеличение ширины канала обеспечивает finFET-транзистору, по сравнению с планарным, более высокое быстродействие, а также снижает потребляемую мощность – как за счёт снижения токов утечки, так и за счёт снижения напряжения питания транзистора [1].

В настоящее время среди finFET-FPGA наименьшие технологические нормы (14 нм) – у ПЛИС семейства Stratix 10 фирмы Altera (Intel) [1]. Наиболее высокопроизводительные finFET-FPGA и системы на кристалле фирмы Xilinx производятся по технологии 16 нм [2].

Направление 2. Переход к FPGA с трёхмерной архитектурой – ещё один путь повышения производительности FPGA, снижения потребляемой мощности, а также повышения эффективности использования площади, занимаемой ПЛИС. Под 3D-FPGA ведущие производители FPGA – Xilinx и Altera – понимают установку нескольких кристаллов на общую платформу, которая тем или иным способом обеспечивает взаимодействие между кристаллами. Сами кристаллы при этом могут быть как одинаковыми, так и различными.

Среди продукции, производимой Xilinx, к 3D-FPGA относятся устройства из семейств UltraScale, UltraScale+ и Virtex 7. При производстве 3D-ПЛИС Xilinx использует технологию SSI (Stacked Silicon Interconnect). Эта технология позволяет объединить в одном корпусе несколько кристаллов (рисунок 3), смонтированных на общей коммутационной плате – интерпозере.

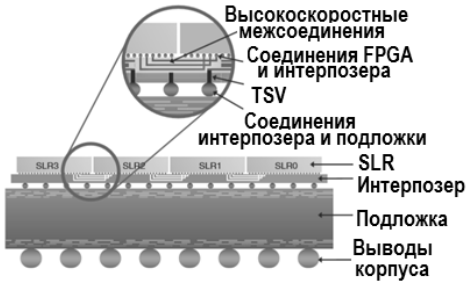


Рисунок 3 – Устройство 3D-FPGA фирмы Xilinx [3]

Интерпозер содержит скоростные горизонтальные межсоединения и сквозные вертикальные межсоединения, называемые TSV (Through-Silicon Vias). Кристаллы соединяются с интерпозером с помощью микроскопических шариков припоя [3, 4]. Интерпозер и подложка соединяются аналогичным способом. Кристаллы FPGA в составе 3D-ПЛИС принято называть «суперлогическими регионами», (Super-Logic Region, SLR).

У фирмы Altera к 3D-FPGA относится семейство Stratix 10 (рисунок 4). Altera называет эти устройства гетерогенными 3D-системами в корпусе (System-in-Package, SiP) [5]. На общей подложке размещаются FPGA и другие устройства (например, приёмопередатчики). Соединения между кристаллами реализуются по технологии фирмы Intel EMIB (Embedded Multi-die Interconnect Bridge), которая позволяет обходиться без интерпозера с вертикальными межсоединениями. EMIB представляет собой небольшой кристалл, встраиваемый в подложку корпуса и содержащий межсоединения, размещённые с высокой плотностью.

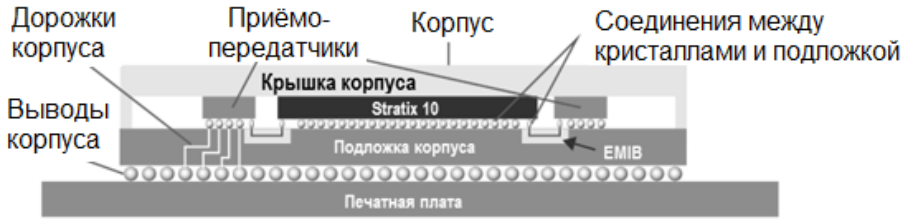


Рисунок 4 – Устройство 3D-FPGA фирмы Altera [5]

Следует заметить, что согласно классификации в [4, 6], рассмотренные FPGA компаний Xilinx и Altera относятся к 2,5D-, а не 3D-FPGA. «Настоящие» 3D-FPGA должны содержать несколько слоёв с логическими ресурсами (активных слоёв), между которыми проложены вертикальные межсоединения. Исследования, направленные на разработку «настоящих» 3D-FPGA, ведутся, некоторые их результаты приводятся, например, в [4].

Направление 3. Оптимизация трассировочных ресурсов. Подсчитано [4], что на трассировочные ресурсы FPGA приходится до 80% задержек распространения сигналов, до 85% потребляемой мощности и до 90% площади кристалла.

Одним из решений, направленных на повышение производительности FPGA, является технология «регистры повсюду», предложенная компанией Altera [7]. По этой технологии, на каждый сегмент межсоединений, а также на входы логических блоков устанавливаются регистры. Эти регистры позволяют поднять максимально достижимые тактовые частоты ПЛИС и снизить сложность задачи трассировки проекта.

Приведём некоторые показатели, достигнутые компанией Altera в результате следования трём перечисленным направлениям. Для FPGA Stratix 10 (finFET, 14 нм, технология «регистры повсюду») по сравнению с Stratix V (планарные транзисторы, 28 нм) может быть достигнуто повышение производительности программируемых ресурсов в 2 раза, снижение рассеиваемой мощности – более чем в 3 раза, повышение логической ёмкости – более чем в 5 раз, производительность блоков цифровой обработки сигналов – в 10 раз [8].

Направление 4. Появление программируемых систем на кристалле. Признаком, позволяющим отличить «обычную» FPGA от программируемой системы на кристалле, является наличие встроенных аппаратных процессорных

ядер. В предыдущих поколениях FPGA аппаратные процессорные ядра встраивались в наиболее производительные кристаллы (например, Virtex 7 в рамках 7 серии FPGA от Xilinx). В настоящее время FPGA с встроенными аппаратными процессорными системами выделяются в особый класс устройств. Среди продукции Xilinx к этому классу относятся Zynq 7000 и Zynq UltraScale+. Среди продукции Altera – Stratix10, Arria10, ArriaV, CycloneV.

Рассмотрим, например, организацию программируемых систем на кристалле семейства Zynq7000 [9]. Они состоят из процессорной системы (ПС) на базе ядер ARM Cortex-A9, массива КЛБ, ЦОС-блоков, блоков ОЗУ и других ресурсов (рисунок 5).

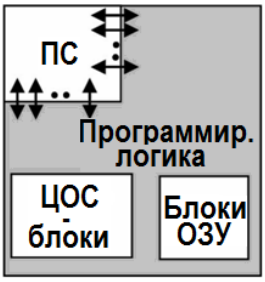


Рисунок 5 – Структура программируемой системы на кристалле Zynq 7000

Направление 5. Повышение уровня абстракции при описании проектируемых устройств.

При проектировании устройств на ПЛИС традиционно использовались языки описания аппаратуры (VHDL, Verilog) и описания устройств в виде схем. В обоих случаях от разработчика требуется детальное описание обработки сигналов устройством: указания времени (условий) обработки каждого из сигналов и логических элементов, вовлечённых в процесс обработки.

С увеличением объёма логических ресурсов ПЛИС и сложности создаваемых устройств стало актуальным повышение уровня абстракции при описании последних. Одним из решений этой проблемы стало описание устройств в виде математических моделей, создаваемых в среде MATLAB/Simulink. Для этих целей в Simulink интегрируется программный пакет, разработанный фирмой-производителем ПЛИС (у Xilinx это System Generator for DSP, у Altera – DSP Builder). Готовая модель, отлаженная средствами Simulink, преобразуется в HDL-описание, импортируемое средой проектирования устройств на ПЛИС. Такой подход характерен для проектирования устройств цифровой обработки сигналов.

Более универсальным решением, предложенным фирмой Xilinx в САПР Vivado HLx Design Suite, является возможность описания устройств на языках высокого уровня: C, C++ или SystemC. Описание проектируемых устройств на языках HDL в Vivado также доступно, а вот схемотехническое описание исключается. В некотором смысле альтернативой схемотехническому редактору является инструмент IP Integrator, который, однако, работает с IP-блоками [10]. Конкретные схемотехнические решения, касающиеся способа реализации устройства, Vivado HLx Design Suite принимает на основе директив и проектных ограничений, указанных пользователем. Автоматизированное выполнение многих трудоёмких процедур позволяет значительно сократить время проектирования, а использование языков высокого уровня – привлечь к проектированию программистов.

Следует отметить, что Vivado не только предлагает другие способы описания устройств, но и использует более мощные по сравнению с предыдущим поколением САПР (ISE Design Suite) средства синтеза и реализации проекта.

Таким образом, снижение технологических норм производства и новые архитектурные решения для FPGA привели к значительному улучшению характеристик последних и повышению их логической ёмкости. Повышение логической ёмкости, в свою очередь, привело к обновлению средств синтеза и реализации проектов на FPGA, а разработчикам устройств на ПЛИС предоставило возможность описания устройств на более высоких уровнях абстракции.

Список литературы

1. *The Breakthrough Advantage for FPGAs with Tri-Gate Technology. URL: https://www.altera.com/en_US/pdfs/literature/wp/wp-01201-fpga-tri-gate-technology.pdf*
2. *Xilinx FPGAs & 3D ICs. URL: https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga.html*
3. *Xilinx Stacked Silicon Interconnect Technology Delivers Breakthrough FPGA Capacity, Bandwidth, and Power Efficiency. URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/white_papers/wp380_Stacked_Silicon_Interconnect_Technology.pdf*
4. *Pangracious V., Marrakchi Z., Mehrez H. Three-Dimensional Design Methodologies for Tree-based FPGA Architecture. – Springer International Publishing, 2015.*
5. *Enabling Next-Generation Platforms Using Intel's 3D System-in-Package Technology. URL: https://www.altera.com/content/dam/altera-www/global/en_US/pdfs/literature/wp/wp-01251-enabling-nextgen-with-3d-system-in-package.pdf*
6. *Рабаи Ж.М., Чандракасан А., Николич Б. Цифровые интегральные схемы, 2-е изд.: пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. – 912с.*
7. *A New FPGA Architecture and Leading-Edge FinFET Process Technology Promise to Meet Next-Generation System Requirements. URL: https://www.altera.com/content/dam/altera-www/global/en_US/pdfs /literature/wp/wp-01220-hyperflex-architecture-fpga-socs.pdf.*
8. *Строгонов А., Городков П. 3D-технологии в ПЛИС типа ППВМ. // Компоненты и технологии. – 2016. - №7. – с.60-64.*
9. *Woods R. et al. FPGA-based implementation of signal processing systems. Second Edition. – John Wiley & Sons, 2017.*
10. *Тарасов И.Е. Использование IP Integrator в САПР Vivado для ПЛИС серии 7 и UltraScale // Компоненты и технологии. – 2013. – №12. – с.33-36.*

УДК 004.771
ББК 30

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ КОМПЬЮТЕРНОЙ АУДИТОРИИ ВУЗА С СИНХРОННЫМ ВРЕМЕНЕМ ДОСТУПА

© ***А.А. Воронцов***, *Пензенский государственный технологический университет (Пенза, Россия)*
© ***А.Н. Пименов***, *Пензенский государственный технологический университет (Пенза, Россия)*

MATHEMATICAL MODELING OF TIME CHARACTERISTICS OF THE LOCAL NETWORK OF THE COMPUTER AUDIENCE OF THE HIGHER SCHOOL WITH SYNCHRONOUS ACCESS TIME

© ***A.A. Vorontsov,*** *Penza State Technological University (Penza Russia)*
© ***A.N. Pimenov,*** *Penza State Technological University (Penza Russia)*

Целью работы является анализ возможности использования локальных сетей с синхронным временем доступа в компьютерных аудиториях ВУЗа. Рассматриваются вопросы, связанные с эффективностью локальных сетей, на основании анализа ее временных характеристик, таких как среднее квадратическое отклонение и дисперсию линии задержки в непрерывном времени, а также среднее время задержки пакета данных с учетом требований, предъявляемых к современным локальным сетям. Выполнено соответствующее моделирование и получены результаты.

Ключевые слова: локальная сеть, временные характеристики, компьютерная аудитория, моделирование, синхронный доступ, время доступа, компьютерное моделирование.

The aim of the work is to analyze the possibility of using local networks with synchronous access time in the computer rooms of the university. Issues related to the efficiency of local networks are considered based on an analysis of its time characteristics, such as the standard deviation and dispersion of the delay line in continuous time, as well as the average delay time of the data packet, taking into account the requirements for modern local networks. The corresponding simulation was performed and the results obtained.

Key words: local network, time characteristics, computer audience, modeling, synchronous access, access time, computer simulation.

E-mail: Aleksander.Vorontsov@gmail.com

На сегодняшний день практически каждая организация имеет свою локальную сеть. Перспективность их создания обусловлена возможностью совместного доступа узлов сети, суммирования вычислительных мощностей, организация доступа к единым базам данных, повышения эффективности работы организации в целом. Каждую из локальных сетей можно представить как совокупность ее частей, то есть сегментов, в состав которых входит множество устройств, таких как компьютеры, ноутбуки, принтеры, сканеры, промежуточные сетевые устройства и т.д.

Существует множество вариантов построения локальных сетей с использованием различных топологий. Наиболее распространенными в локальных сетях топологиями на данный момент являются пассивные “звезда” и “дерево”, однако в случае использования небольшого количества узлов и ограниченного бюджета на реализацию сети, в ней возможна реализация и топологии “шина”. К преимуществам последней можно также отнести возможность отключения и подключения узлов сети даже во время работы остальных узлов.

На данный момент в учебных заведениях в ВУЗах создаются и активно используются компьютерные аудитории, содержащих от нескольких единиц до нескольких десятков узлов, то есть компьютеров, принтеров и т.д. При сравнительно небольших передачах данных между ними в таких аудиториях возможно их соединение по топологии “шина”.

Одним из важных вопросов, которые необходимо учитывать при работе в локальной сети, в частности в компьютерных аудиториях ВУЗов, являются вопросы, связанные с синхронизацией передачи данных и целостности передаваемой информации.

Существует множество методов управления передачи данных в локальных сетях, наиболее простым с точки зрения реализации из которых является метод синхронного времени доступа узлов к сети, в котором каждому из устройств для передачи данных отводится квант времени, по истечению которого передача данных осуществляется следующим устройством. Данный метод можно использовать в локальных сетях с небольшим количеством узлов, в частности в компьютерных аудиториях ВУЗов.

Оценка эффективности работы в таких сетях при передаче данных также является важной задачей, реализация которой возможна при исследовании временных характеристик, основными из которых являются среднее время и дисперсия времени задержки данных в непрерывном времени, а также его среднее квадратическое отклонение.

Таким образом, уточнению существующих математических моделей временных характеристик локальных сетей и их адаптация к требованиям, предъявляемым к современным локальным вычислительным сетям на примере компьютерной аудитории ВУЗа и посвящена данная статья.

Как уже было ранее отмечено, к основным временным характеристикам в локальных сетях можно отнести среднее время и дисперсия времени задержки данных в непрерывном времени, а также его среднеквадратическое отклонение. Их для локальных сетей с синхронным временным доступом можно определить по известным выражениям, например из [1].

Так, согласно указанному источнику среднее время задержки пакета данных можно определить по формуле:

$$\overline{t_q} = \frac{N \cdot n_{ok} \cdot (2 - q_i \cdot (N+1)}{2 \cdot V_C \cdot (Q_C - q_i \cdot N)}, \quad (1)$$

где N – количество узлов сети; V_C - скорость передачи данных в сети.

Параметр сети Q_C можно определить по формуле $Q_C = (1-p)^{n_k}$, где p – вероятность возникновения ошибки в канале связи при обслуживании пакета данных а n_k – количество разрядов кадра, определяемое согласно выражению:

$$n_k = r_a + r_y + r_k + k, \quad (2)$$

где r_a – количество разрядов в поле адреса пакета данных, $r_a = 2 \cdot \log_2 N$, r_y – количество разрядов управления в пакете данных, r_k – количество контрольных разрядов пакета данных, k – количество разрядов пакета данных.

Необходимо отметить, что в современных локальных сетях количество разрядов пакета данных в среднем составляет 1024 бита, а согласно требованиям к локальным сетям [2] вероятность возникновения ошибки должна быть

не более $10^{-8}…10^{-12}$. Учитывая эти факты, параметр сети Q_c можно в расчетах брать равным Q_c=1 .

Коэффициент n_{ok} можно определить как $n_{ok} = \overline{n_k} + n_{kv} + n_{pm}$, в котором n_{kv} – количество разрядов, передаваемых по обратной связи (квитанция) для контроля ошибок в компьютерной сети, n_{pm} – коэффициент, зависящий от выбранной топологии сети, определяемый для топологии шина по известной формуле:

$$n_{pm}=4\cdot10^{-6}\cdot D_m\cdot V_c, \quad (3)$$

где D_m - длина канала связи, V_c - скорость передачи данных в сети.

Коэффициент $\overline{n_k}$ можно определить согласно выражению:

$$\overline{n_k} = n_k + r_{pr} + r_f, \quad (4)$$

где r_{pr} и r_f - количество разрядов преамбулы и флага пакета данных соответственно.

Вероятность появления заявки на такте q_i можно определить согласно выражению [1]:

$$q_i = \lambda_i \cdot T_0, \quad (5)$$

где λ_i - интенсивность поступления потока заявок в буфер. T_0 - длительность тактового интервала передачи данных, определяемый по формуле:

$$T_0 = (\overline{n_k} + n_{pm} + n_{kv}) \cdot V_c^{-1}, \quad (6)$$

Учитывая выражения (2),(4) и (6) формулу (1) можно привести к следующему виду:

$$\overline{t_q} = \frac{N \cdot T_0 \cdot (2 - q_i \cdot (N+1)}{2 \cdot (Q_c - q_i \cdot N)} \quad (7)$$

Дисперсия линии задержки в непрерывном времени можно определить согласно известного выражения [1]:

$$D_{t_q} = T_0^2 \cdot \left(\begin{array}{l} \dfrac{\dfrac{3N \cdot (2N - Q_c - NQ_c)}{Q_c^2} \cdot \dfrac{2Q_c^2(1-\Theta) + q_i^2 N(2N - Q_c - NQ_c)}{Q_c^2}}{6 \cdot (1-\Theta)^2} + \\ + \dfrac{\dfrac{2q_i \cdot (1-\Theta)(NQ_c(N-1)(4NQ_c - 2Q_c - 3N) + 3NP_c(2N - Q_c - NQ_c)}{Q_c^3}}{6 \cdot (1-\Theta)^2} + \\ + \left(\dfrac{N}{Q_c} + \dfrac{q_i N(2N - Q_c - NQ_c)}{2 \cdot (1-\Theta) Q_c^2} - \left(\dfrac{N}{Q_c} + \dfrac{q_i N(2N - Q_c - NQ_c)}{2 \cdot (1-\Theta) Q_c^2} \right)^2 \right) \end{array} \right), \quad (8)$$

где P_c - коэффициент, $P_c = 1 - Q_c, \Theta$ - вероятность того, что буфер занят, определяемая по формуле:

$$\Theta = q_i * N/Q_c, \quad (9)$$

С учетом того, что параметр сети Q_C можно в расчетах брать равным Q_C=1, а также известных математических операций, выражении (8) возможно привести к следующему виду:

$$D_{t_q} = T_0^2 \cdot \left(\begin{array}{l} \dfrac{3N \cdot (2N - Q_c - NQ_c) \cdot 2Q_c^2 (1-\Theta) + q_i^2 N(2N - Q_c - NQ_c)}{6Q_c^4 \cdot (1-\Theta)^2} + \\ + \dfrac{2q_i \cdot (1-\Theta)(NQ_c(N-1)(4NQ_c - 2Q_c - 3N)}{6Q_c^4 \cdot (1-\Theta)^2} + \\ + \left(\dfrac{N}{Q_c} + \dfrac{q_i N(2N - Q_c - NQ_c)}{2 \cdot (1-\Theta) Q_c^2} - \left(\dfrac{N}{Q_c} + \dfrac{q_i N(2N - Q_c - NQ_c)}{2 \cdot (1-\Theta) Q_c^2} \right)^2 \right) \end{array} \right) \quad (10)$$

В выражении (10) возможны и дальнейшие упрощения, однако именно в этом виде будем его использовать для последующих вычислительных экспериментов. Расчет немаловажной характеристики среднеквадратического отклонения будет производиться по известной формуле:

$$\sigma = \sqrt{D_{t_q}} \quad (11)$$

Так как время задержки пакета не должно быть отрицательным, то в формуле (1) должно выполняться условие $Q_C > q_i \cdot N$.

Определим максимально возможные значения q_i при различных значениях *N*.

Количество узлов в сети *N*=32 является на сегодняшний день вполне приемлемым значением для компьютерного класса. Исходя из этого значения и с учетом того, что значение Q_C можно в расчетах брать равным Q_C=1, значение $q_i < 1/32$. Это вносит согласно выражению (5) ограничения на значение λ_i – интенсивности поступления потока заявок в буфер. Необходимо отметить, что максимально возможное значение λ_i для количества узлов в локальной сети равного 32 и других значений, подробно описываемых для основного варианта локальной сети в эксперименте будет ограничено значением 76, поэтому в эксперименте указанное значение будет не превышать 60 пакетов в секунду.

Определимся со значениями всех переменных, входящих в состав выражений (1-10) для основного варианта локальной сети. Под термином основной вариант будем понимать значения переменных, которые будем брать для моделирования в дальнейшем. Выберем следующие значения величин, входящих в состав выражений (1-10):

- количество разрядов пакета данных k=1024 бита;
- количество узлов сети N=32;
- скорость передачи данных в сети V_C=100 Мбит;
- количество разрядов в поле адреса пакета данных $r_a = 2\log_2 N$=10 бит;
- количество разрядов управления в пакете данных r_y=16 бит;
- количество контрольных разрядов пакета данных, r_k=16 бит;

- вероятность возникновения ошибки в канале связи при обслуживании пакета данных $p = 10^{-9}$;
- количество разрядов, передаваемых по обратной связи (квитанция) для контроля ошибок в компьютерной сети n_{kv}=32 бит;
- длина канала связи D_m=100 м;
- количество разрядов преамбулы пакета данных r_{pr} =32 бита;
- количество разрядов флага пакета данных r_f =8 бит;
- интенсивность поступления потока заявок в буфер λ_i=60 пакетов/сек.

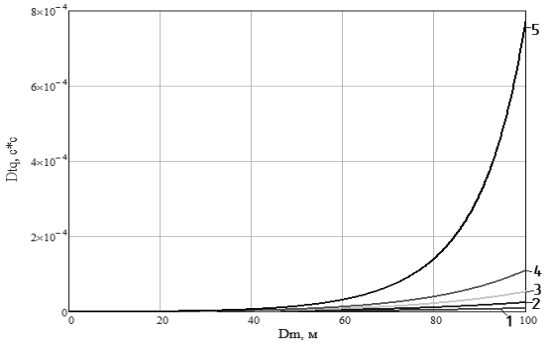


Рисунок 1 – Результаты моделирования зависимости дисперсии линии задержки пакета данных в непрерывном времени от длины канала связи D_m для различных значений интенсивности поступления потока заявок в буфер λ_i

Результаты моделирования зависимости дисперсии линии задержки в непрерывном времени D_{t_q}, среднеквадратического отклонения σ и среднее время задержки пакета данных $\overline{t_q}$ от длины канала связи D_m для различных значений интенсивности поступления потока заявок в буфер λ_i приведены на рисунках 1, 2 и 3 соответственно. На них кривая 1 получена для значения λ_i=10, кривые 2, 3, 4 и 5 для значений 20, 30, 40 и 60 пакетов в секунду соответственно. Длина канала связи D_m измеряется в метрах, дисперсия линии задержки в непрерывном времени D_{t_q} - в с^2, среднеквадратическое отклонения σ и среднее время задержки пакета данных $\overline{t_q}$ в секундах

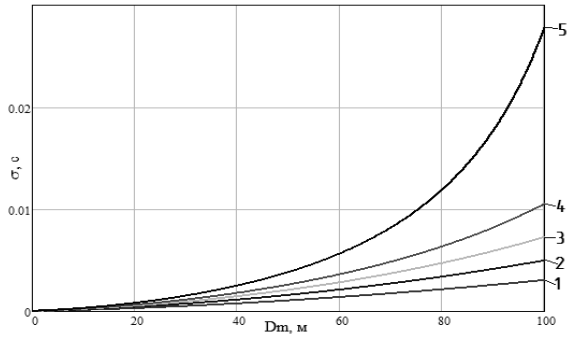


Рисунок 2 – Результаты среднеквадратического отклонения σ времени задержки пакета данных от длины канала связи D_m для различных значений интенсивности поступления потока заявок в буфер λ_i

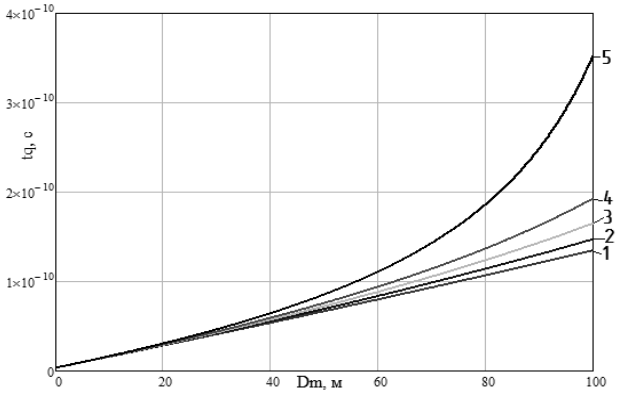


Рисунок 3 – Результаты моделирования зависимости среднего времени задержки пакета данных $\overline{t_q}$ от длины канала связи D_m для различных значений интенсивности поступления потока заявок в буфер λ_i

Вычислительный эксперимент, результаты которого приведены на рисунках 1 – 3 показали, что с увеличением длины канала связи и количества пакетов заявок наблюдается увеличение исследуемых временных характеристик. Наиболее ощутимые изменения наблюдаются для значения $Q_c \approx q_i \cdot N$ (при условии, что $Q_c > q_i \cdot N$).

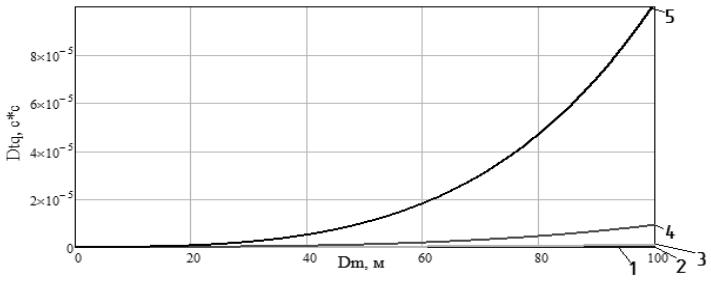


Рисунок 4 – Результаты моделирования зависимости дисперсии линии задержки пакета данных в непрерывном времени от длины канала связи D_m для различных значений количества узлов сети N

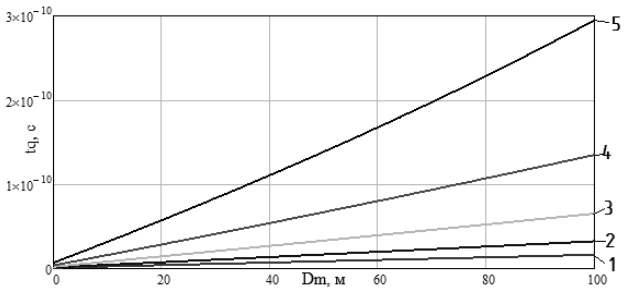


Рисунок 5 – Результаты среднеквадратического отклонения σ времени задержки пакета данных от длины канала связи Dm для различных значений количества узлов сети N

Подобные результаты наблюдались при исследовании при изменении количества узлов *N* для значения интенсивности поступления потока заявок в буфер λ_i=10 пакетов/сек, для количества узлов в локальной сети *N*1=4(кривая 1), *N*2=8 (кривая 2), *N*3=16(кривая 3), *N*4=32(кривая 4), *N*5 =64 (кривая 5) в результатах моделирования зависимости дисперсии линии задержки в непрерывном времени D_{t_q}, среднеквадратического отклонения σ и среднее время задержки пакета данных $\overline{t_q}$ от длины канала связи D_m, приведенных на рисунках 4, 5 и 6 соответственно.

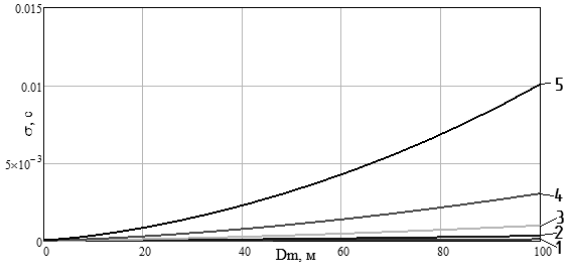


Рисунок 6 – Результаты моделирования зависимости среднего времени задержки пакета данных $\overline{t_q}$ от длины канала связи Dm для различных значений количества узлов сети N

В заключении необходимо отметить, что количество бит пакета данных и полей из которых он состоит, а также их длины отличны у сетей, работающих по интернет протоколу (IPv4 или IPv6), однако эти изменения будут отражены лишь в численных значениях коэффициентов, выражения (1),(3),(5),(7)-(11) останутся неизменными.

Список литературы

1. *Компьютерные сети. 5-е изд. / Э. Таненбаум. – СПб.: Питер, 2012. – 992 с.*
2. *Воронцов А.А. Исследование изменения быстродействия при удаленном подключении по сети интернет к рабочему столу виртуальной машины частного облака ПензГТУ XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Пенза: ПензГТУ, 2016. № 3 (31). С. 173-178.*

УДК 004.324
ББК 32.971.32-02

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВОЗМОЖНОСТЬ АППАРАТНОЙ ПОДДЕРЖКИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ ПРОЦЕССАМИ В ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ[1]

© ***А.И. Мартышкин***, *Пензенский государственный технологический университет (Пенза, Россия)*

MATHEMATICAL MODELING AND THE POSSIBILITY OF HARDWARE SUPPORT OF CONTROL ALGORITHMS FOR INTERACTIVE PROCESSES IN HIGH-PERFORMANCE COMPUTING SYSTEMS

© ***A.I. Martyshkin***, *Penza State Technological University (Penza Russia)*

Статья посвящена исследованию математических моделей подсистемы планирования и диспетчеризации высокопроизводительных систем, а также возможности аппаратной реализации основных алгоритмов работы в виде реконфигурируемой вычислительной системы. Описаны основные достоинства и недостатки существующих моделей и возможность их устранения. Представлена схема аппаратно реализованной реконфигурируемой системы и диаграммы ее работы. В заключении сделаны выводы по основным результатам.

Ключевые слова: аппаратная реализация, высокопроизводительная система, диспетчеризация, переключение процессов, ПЛИС, реконфигурируемая вычислительная система, синхронизация, система реального времени

The article is devoted to research of mathematical models of a subsystem of planning and dispatching of high-performance systems, as well as the possibilities of hardware implementation of the main algorithms of work in the form of a reconfigurable computer system. The main advantages and disadvantages of existing models and the possibility of their elimination are described. The scheme of the hardware-implemented reconfigurable system and the diagram of its operation is presented. Finally, the conclusions on the main results are presented.

Key words: Hardware implementation, high-performance system, dispatching, process switching, PLD, reconfigurable computing system, synchronization, real-time system

E-mail: Alexey314@yandex.ru

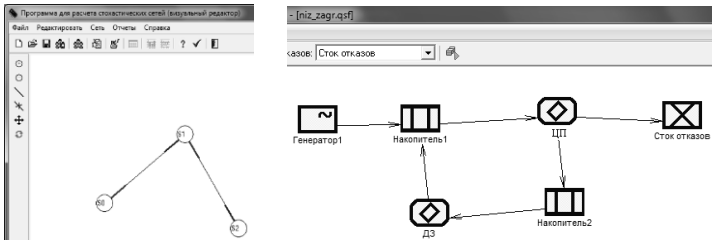
Для обеспечения работы современных систем в реальном времени все более широкое применение находят реконфигурируемые вычислительные системы (РВС) [3,4], создание которых сопряжено с решением задач управления ресурсами путем диспетчеризации, эффективность которой определяется скоростью переключения процессов и потоков.

На основе анализа методов реализации подсистемы планирования и диспетчеризации задач в многопроцессорной системе (МПС), выявлено существование двух основных [6,7]: разделение во времени, достоинством которого является автоматическое поддержание балансировки загрузки, и разделение в пространстве, где отсутствует необходимость перезагрузки кэш-памяти процессора (ЦП) и есть индивидуальные диспетчеры задач (ДЗ) для каждого ЦП. Проведенный анализ показывает, что существующие модели отражают реальные вычислительные процессы довольно грубо, внося значительные погрешности при оценке вероятностно-временных характеристик узлов системы, а в некоторых случаях приводя к ложным результатам.

[1] *Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 16-07-00012 А).*

На рисунке 1,а представлен граф аналитической модели РВС с общим ДЗ, где S_0 – источник задач, S_1 – процессоры, S_2 – ДЗ [6].

На рисунке 1,б приведена имитационная модель этой системы. Здесь Генератор 1 – источник задач, Накопитель 1 – очередь перед ЦП, ЦП – блок процессоров, Сток отказов – счетчик приостановленных задач, Накопитель 2 – очередь ожидающих ДЗ процессоров, ДЗ – диспетчер задач.



а) б)

Рисунок 1 – Граф аналитической (а) и имитационной (б) модели РВС с общим ДЗ

Приостановка обслуживания задач происходит в том случае, когда все k мест в очереди перед ЦП заняты [6]

$$p_{приост} = \frac{\omega_1^{n+k}}{n^k n!} p_0, \qquad (1)$$

где p_0 – вероятность отсутствия задач в ЦП (S_1), n – число ЦП, k – число мест в очереди перед ЦП.

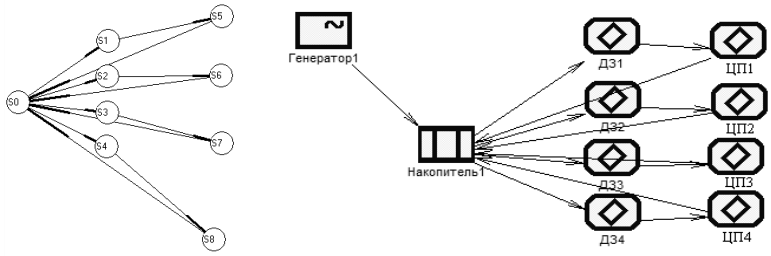
Время реакции системы с ДЗ и общей очередью задач составит

$$U = \alpha_1 \cdot u_1 + \alpha_2 \cdot u_2. \qquad (2)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты передачи, показывающие, сколько раз задача проходит через узлы S_1 и S_2 соответственно; u_1, u_2 – время реакции ЦП и от ДЗ соответственно.

Главное отличие от моделей-аналогов в том, что ДЗ выделен в самостоятельный обслуживающий ресурс.

На рисунке 2,а представлен граф аналитической модели 4-х процессорной РВС с раздельными ДЗ, где *S*0 – источник задач, *S*1…*S*4 – процессоры, *S*5…*S*8 – ДЗ [6]. На рисунке 2,б приведена имитационная модель этой системы. Здесь Генератор 1 – источник задач, Накопитель 1 – очередь перед ДЗ, ДЗ1…ДЗ4 – индивидуальные ДЗ для каждого ЦП; ЦП1…ЦП4 – 4 процессора.



а) б)

Рисунок 2 – Граф аналитической (а) и имитационной (б) модели РВС с распределенными ДЗ

Приостановка обслуживания задач происходит, когда подсистема «ДЗ–ЦП» занята и все *k* мест в очереди тоже, вероятность приостановки [6]

$$p_{приост_i} = \frac{\rho_i^{k+1}(1-\rho_i)}{1-\rho_i^{k+2}}, \quad (3)$$

где $\rho_i = \lambda_i \cdot (\tau_{ДЗ} + \nu_{ПУ})$ [6].

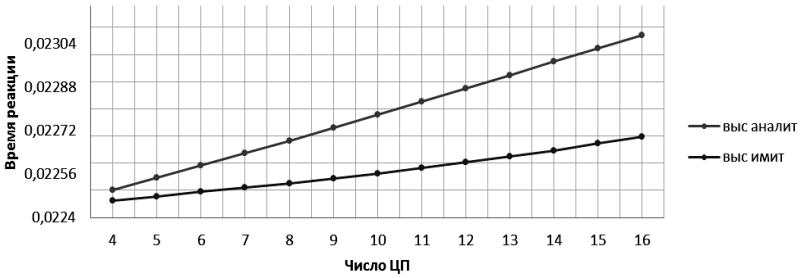
Время реакции системы с распределенными ДЗ находится по формуле

$$U = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot u_i \quad (6)$$

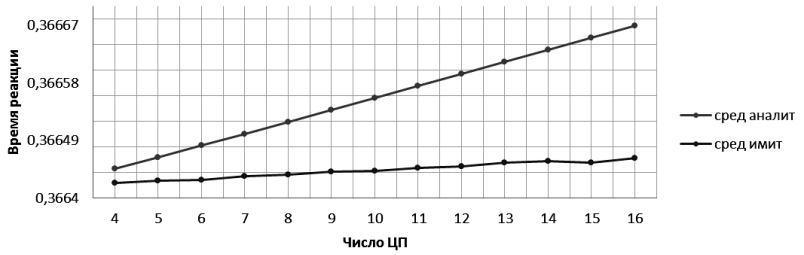
где α_i – коэффициент передачи *i*-го узла; u_i – время реакции подсистемы «ДЗ–ЦП».

Отличие от моделей-аналогов в том, что ДЗ представлен отдельным блоком. Здесь учтены задержки, связанные с переключением контекста задачи, балансировка загрузки ЦП и связанные с ней временные задержки.

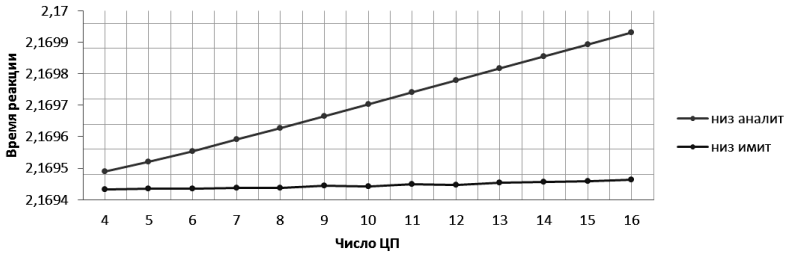
На показанных моделях проведены эксперименты, полученные характеристики которых соответствуют системам «мягкого» реального времени. Некоторые результаты показаны на рисунке 3-4.



а)



б)

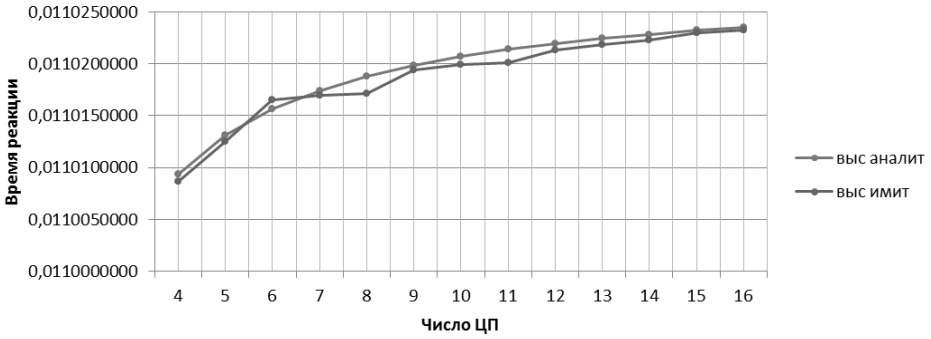


в)

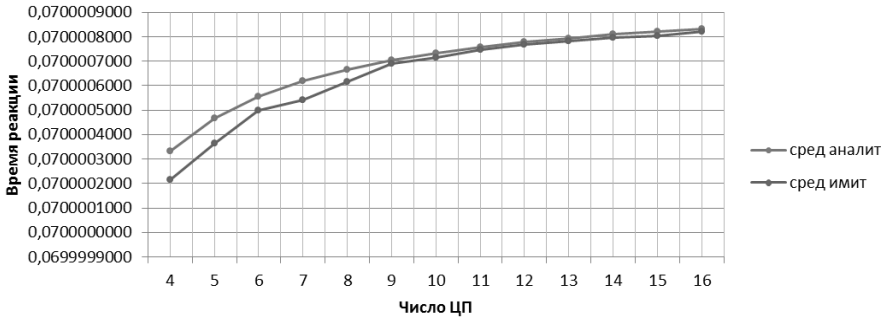
Рисунок 3 – Зависимость времени реакции от числа ЦП при высокой (а), средней (б) и низкой (в) трудоемкости задач в системе с общим ДЗ

Рисунок 3 и 4, показывают результаты динамики времени реакции при увеличении числа ЦП. При сопоставлении характеристик моделей можно выявить, что в системе с распределенными ДЗ кривая имеет равномерный и стабильный рост, как в аналитической модели, так и имитационной, когда как в системе с общим ДЗ подобная зависимость не наблюдается.

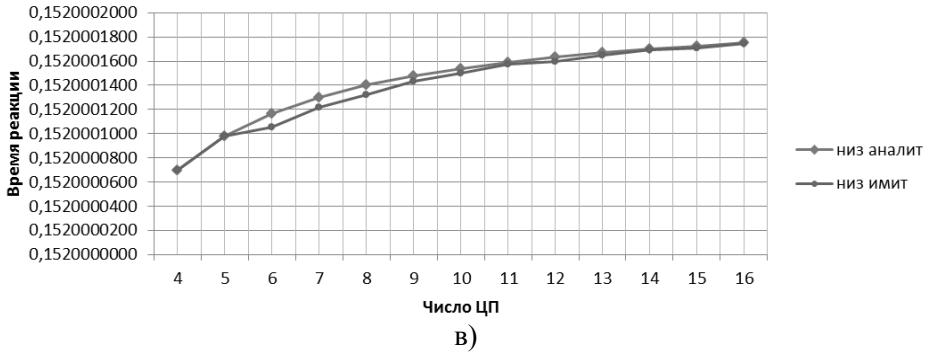
Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы. В большинстве случаев показатели аналитических и имитационных моделей, таких как загрузка ДЗ, время реакции, и т.д. имели небольшой разброс относительно друг друга, что соответствует адекватности и целесообразности применения показанных моделей. Предложенные и описанные модели могут быть реализованы в реконфигурируемой вычислительной системе (РВС).



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Зависимость времени реакции от числа ЦП при высокой (а), средней (б) и низкой (в) трудоемкости в системе с распределенными ДЗ

Современные тенденции развития микроэлектроники позволяют применять архитектурные решения, повышающие производительность вычислитель-

ных систем. РВС являются перспективными разработками в области высокопроизводительных вычислений. Смысл данного решения заключается в использовании ПЛИС вместо ЦП, что дает возможность создания гибкой системы [5]. Подобное решение можно применить в реализации аппаратного ДЗ [1, 2], входящего в состав разрабатываемой РВС. Представляемая РВС – это устройство, состоящее из 4-х реконфигурируемых ЦП, реализованных аппаратно на ПЛИС (рисунок 5).

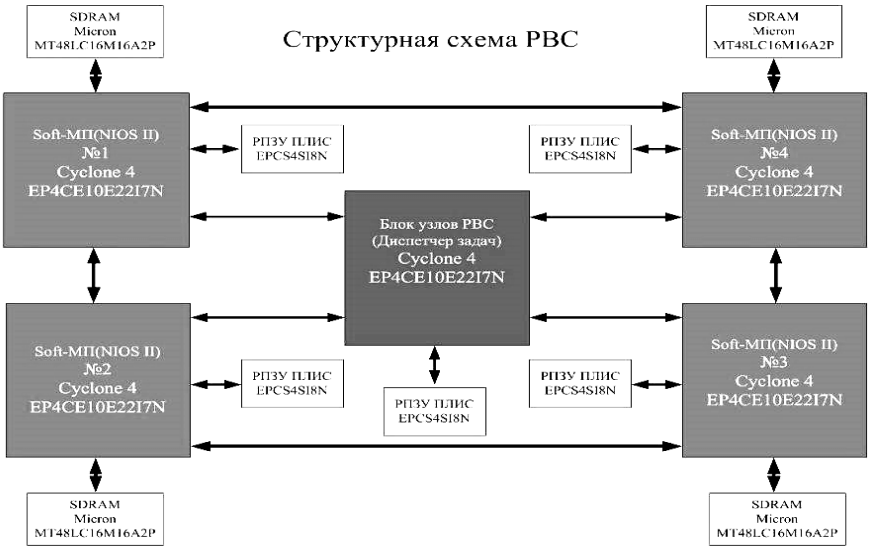
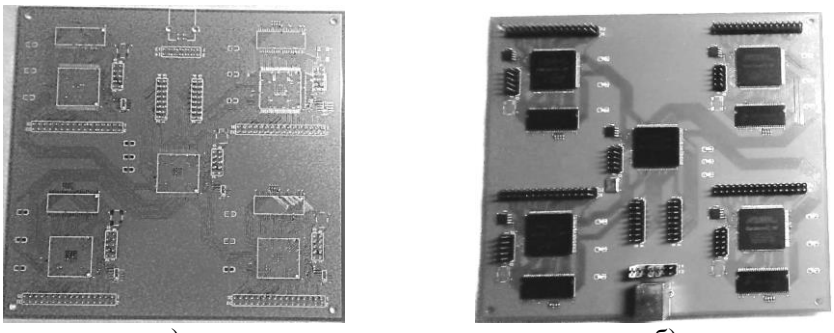


Рисунок 5 – Реконфигурируемая вычислительная система

Разрабатываемая РВС состоит из следующих компонентов:

- 5 ПЛИС *Cyclone* 4 EP4CE10E22I7N фирмы *Intel*. 4 ПЛИС используются для реализации *soft*-микропроцессорных ядер *Nios* II, одна ПЛИС выделена под блок связи узлов системы;
- 5 РПЗУ ПЛИС EPCS4SI8N фирмы *Intel* для хранения конфигурации каждой ПЛИС;
- 4 SDRAM MT48LC16M16A2 фирмы *Micron*, используемые как блоки ОЗУ.

На основе приведенной схемы разработаны принципиальная схема и схема печатной платы, по которым был создан опытный образец устройства, представленный на рисунке 6.



а) б)

Рисунок 6 – Печатная плата опытного образца (а), опытный образец РВС (б)

Теперь перейдем к рассмотрению возможной аппаратной реализации блока ДЗ, структура которого представлена на рис. 7.

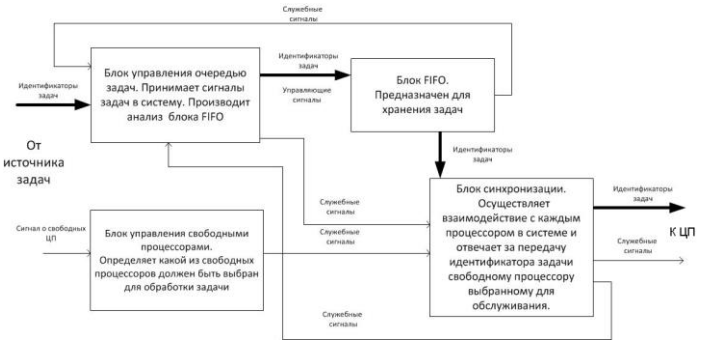


Рисунок 7 – Структурная схема ДЗ

Согласно представленной структурной схеме ДЗ, в нее входят следующие узлы: Блок управления очередью задач – принимает идентификаторы задач (*Id*) в систему и определяет, имеется ли свободное место в очереди, если есть, направляет *Id* новой задачи в блок очереди *FIFO*. Им же производится выборка *Id* задачи из очереди для обработки в свободном ЦП. Блок очереди хранения задач *FIFO* в соответствии с сигналом запроса от блока управления очередью размещает *Id* новой задачи в хвост списка или извлекает *Id* задачи из головы списка для направления его в ЦП. Блок синхронизации – основной. Его работа заключается в анализе информации об ожидающих заявках в системе и о свободных ЦП, которые можно назначить для обслуживания этих заявок. Блок синхронизации способствует взаимодействию с каждым ЦП в системе и отвечает за передачу Id задачи свободному ЦП, выбранному для обработки.

Модуль ДЗ спроектирован в САПР *QuartusII*, на языке *VHDL*. Для проведения экспериментов были созданы блоки имитации 4-х ЦП и блок генератора задач. Моделирование проводилось в ПО *ModelSim-Altera* 10.0c. Были получены временные диаграммы (рисунок 8) работы РВС с ДЗ.

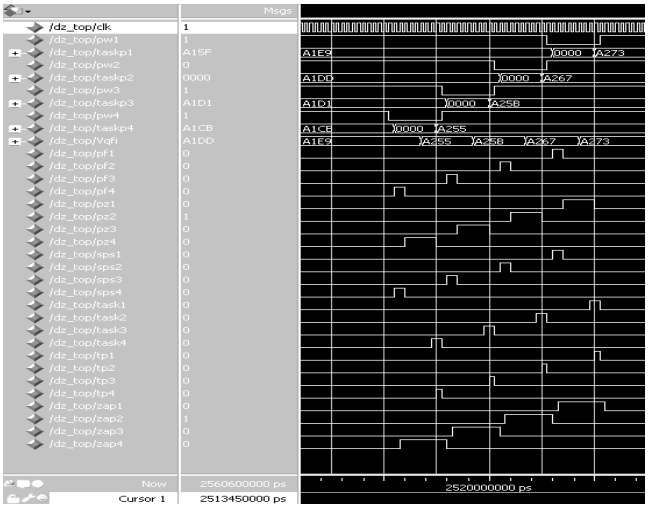


Рисунок 8 – Временные диаграммы работы РВС с ДЗ

Полученные диаграммы показывают, что *Id* поступившей задачи A255 передался на обработку в 4-й ЦП (*taskp4*), после чего этот ЦП выставляет сигнал о принятии задачи на обработку (*tp4*). 4-й ЦП оказывается занятым, поэтому следующий *Id* задачи A25B принимается на обработку в 3-й ЦП, который подобно четвертому выставляет сигнал (*tp3*) о том, что приступил к обслуживанию задачи. Такой принцип назначения ЦП на обслуживание задач обусловлен конкретно выбранной схемой приоритетов: от высокого к низкому, т.е. от четвертого ЦП к первому.

На основе анализа существующих моделей ДЗ в МПС и РВС предложены уточненные модели подсистемы «ДЗ–ЦП», основанные на приоритетных системах массового обслуживания и системах с ограничением длины очереди с использованием открытых сетей массового обслуживания.

Рассмотрена и описана структура РВС. Разработано VHDL описание подсистемы планирования и диспетчеризации задач, что позволяет рассмотреть работу РВС в режиме реального времени. В ходе проведенного исследования выявлено, что ДЗ в РВС успевает обрабатывать весь поток поступающих задач. Он не перегружен на всем временном интервале моделирования и способен обрабатывать более интенсивный входящий поток.

Областью применения полученных результатов являются вычислительные системы, где важно повышение производительности и эффективности. Однако с практической точки зрения в применении РВС, в частности в цифровой обработке сигнала, еще много различных проблем, которые необходимо решить. Поэтому дальнейшим развитием данной работы может быть исследование дополнительных функциональных узлов для ускорения доступа ЦП в память, а также создание интерфейса и протокола обмена между микросхемами – модулями РВС.

Список литературы

1. *Бикташев Р.А. Диспетчер задач многопроцессорной системы с аппаратной поддержкой // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2011. – № 3 (03). – С. 111-115.*
2. *Вашкевич Н.П., Бикташев Р.А., Меркурьев А.И. Аппаратная поддержка диспетчера задач с глобальной очередью в многопроцессорных системах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3. – С. 3-14.*
3. *Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры. Изд. 2-е, перераб. и доп. Под общ. ред. И.А. Каляева. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. – 344 с.*
4. *Левин И.И. Реконфигурируемые вычислительные системы с открытой масштабируемой архитектурой. Параллельные вычисления и задачи управления (PACO'2010): Труды Пятой Международной конференции. М.: Учреждение РАН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2010. – С.83-95.*
5. *Мартенс-Атюшев Д.С., Мартышкин А.И. Реконфигурируемый вычислительный кластер для цифровой обработки сигнала // в сб.: Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов сборник статей XIII Всероссийской научно-технической конференции. Под ред. И.И. Сальникова. Пенза, 2015. – С.112-117.*

6. *Мартышкин А.И., Бикташев Р.А., Востоков Н.Г. Математическое моделирование диспетчеров задач для систем параллельной обработки на основе разомкнутых систем массового обслуживания // В мире научных открытий. – 2013. – № 6.1 (42). – С. 81-101.*
7. *Таненбаум Э., Бос Х. Современные операционные системы. – СПб.: Питер, 2015. – 1120 с.*

УДК 004.324
ББК 32.971.32-02

ВОЗМОЖНЫЙ ВАРИАНТ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ АППАРАТНОГО АРБИТРА ОБЩЕЙ ШИНЫ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ [1]

© ***А. И. Мартышкин****, Пензенский государственный технологический университет (Пенза, Россия)*

POSSIBLE OPTION OF THE FUNCTIONAL ORGANIZATION OF HARDWARE ARBITER OF RECONFIGURABLE SYSTEM'S COMMON BUS

© ***A. I. Martyshkin****, Penza State Technological University (Penza Russia)*

Статья посвящена исследованию аппаратного арбитра в составе реконфигурируемой вычислительной системы. Результатом проведенного исследования является рассмотренный вариант реализации и функционирования аппаратного арбитра. Описан состав предлагаемого устройства. Представлена функциональная схема модуля арбитра, синтезированная в САПР Web pack ISE. Приведены временные диаграммы работы компонента выбора ведущего процессора аппаратным арбитром. В заключении сделаны выводы.

Ключевые слова: аппаратный арбитр, общая шина, многопроцессорная система, статические приоритеты, динамические приоритеты, централизованный арбитраж, децентрализованный арбитраж, функциональная организация, ПЛИС

The article is devoted to the investigation of the hardware arbiter in the reconfigurable computer system. The result of the conducted research is the considered variant of realization and functioning of the hardware arbiter. The composition of the proposed device is described. A functional diagram of the arbitrator module, synthesized in CAD Web pack ISE, is presented. The time diagrams of the work of the component of the selection of the master processor by the hardware arbiter are given. Finally, the conclusions are presented.

Key words: hardware arbiter, common bus, multiprocessor system, static priorities, dynamic priorities, centralized arbitration, decentralized arbitration, functional organization, FPGA

E-mail: Alexey314@yandex.ru

Жизнь современного человека пропитана вычислительной техникой. Сейчас проблема производительности вычислительных машин актуальна, в том числе и потому, что круг задач, решаемых на ЭВМ, существенно вырос, а также потому, что возросла сложность самих решаемых задач. Одним из путей к определенному решению этой проблемы стало появление современных высокопроизводительных вычислительных систем [2,3]. Здесь немаловажное значение имеет организация шинного арбитра, который управляет процессом занятия и освобождения обшей шины (ОШ) в вычислительных системах. От того, насколько правильно и качественно продумана

[1] *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант № 16-07-00012 А).*

функциональная организация арбитра, зависит быстродействие вычислительной системы в целом [6,7]. Этим обусловлена актуальность статьи.

Целью статьи является разработка аппаратного арбитра ОШ, реконфигурируемой вычислительной системы (РВС), состоящей из трех блоков: арбитр шины, общая память и процессорные модули (ПМ). Блок арбитра шины необходим для управления ОШ. В его состав входят: регистр запросов; схема выделения статических и динамических приоритетов; регистр приоритетов. Модуль выполняет функции: обработка сигналов запроса ОШ от ПМ; анализ запросов и формирование ответа по принципу статических или динамических приоритетов; разрешение или запрет доступа ПМ к ОШ в зависимости от ее текущего состояния; выделение приоритетов ПМ на захват ОШ [4]. Разрабатываемое устройство работает в соответствии с протоколом, определяемым интерфейсом шины *AMBA AHB* [5].

Рассмотрим интерфейс аппаратного арбитра. К нему поступают сигналы *HGRANTm* и *HLOCKm* от всех ведущих устройств (ПМ) системы. Эти сигналы могут быть сгруппированы в массивы, размер которых определяется константой *Nm*. Компонент Арбитра формирует сигнал *HGRANTm* для каждого ведущего, группа этих сигналов так же может быть объединена в массив. Арбитр формирует значение сигнала *HSELs* для всех ведомых; эта группа сигналов может быть объединена в массив, размер которого определяется константой *Ns*. Арбитр формирует значения управляющих сигналов *HMASTLOCK* и *HMASTER*. Для того чтобы арбитр мог отслеживать ход выполнения запросов, он должен отслеживать значения сигналов адреса и управления от ведущего устройства, который в данный момент использует линии адреса и управления. Также арбитр должен отслеживать значения сигналов подтверждения от ведомого устройства, которое участвует в текущем обмене. Отслеживание значений этих сигналов необходимо для определения моментов завершения выполнения транзакций. Для контроля выполнения расщепленных транзакций арбитр должен отслеживать также значение сигнала *HSPLIT*.

Рассмотрим внутреннее устройство блока аппаратного арбитра (рисунок 1). На рисунке 1 в виде соединенных между собой блоков показано внутреннее устройство аппаратного арбитра. Основным модулем арбитра является блок *c_whole_arb*, включающий в себя блоки *c_arb* (блок выбора ведущего устройства), *c_sel* (блок выбора ведомого устройства), *c_end* (блок определения конца запроса) и *c_split* (блок контроля расщепленных транзакций).

Блок определения конца запроса указывает моменты времени, в которые должны быть зафиксированы идентификаторы ведущих и ведомых устройств, которые будут владеть ОШ. Он формирует два выходных сигнала– *selnewmast* и *gonewmast*. Если сигнал *selnewmast* установлен в «1», это указывает, что должен быть зафиксирован номер ведущего устройства, которое будет являться собственником линий адреса и управления.

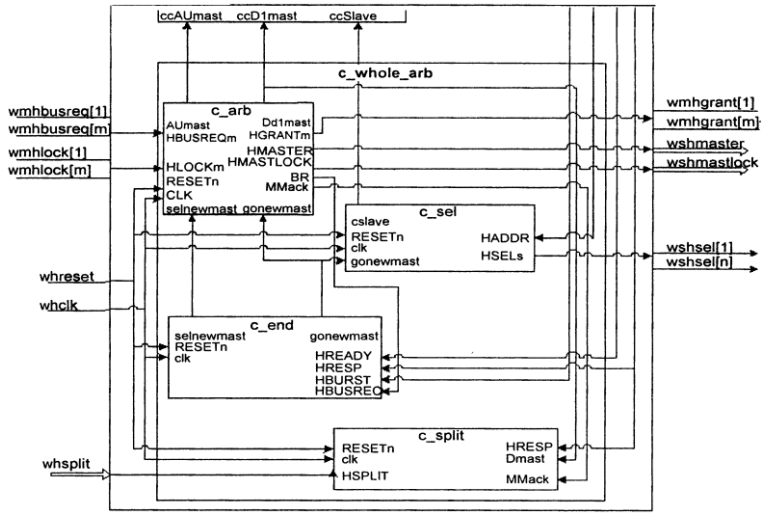


Рисунок 1 – Схема внутреннего устройства аппаратного арбитра.

Установка в «1» сигнала *gonewmast* указывает, что должен быть зафиксирован номер ведущего устройства, которое будет владеть линиями данных, и номер ведомого устройства, которое будет владеть линиями данных и подтверждения от ведомого устройства. Если выполняется пакетный запрос неопределенной длины, то его конец определяется по сбросу сигнала запроса ОШ от ведущего устройства, владеющего линиями адреса и управления. Пусть *br* – сигнал запроса ОШ от ведущего устройства, владеющего линиями адреса и данных. Он поступает к блоку определения конца запроса от блока определения ведущего устройства.

Блок определения ведущего устройства формирует сигналы *HGRANT* для ведущих устройств, значения сигналов *HMASTLOCK* и *HMASTER*, а также сигналы *AUmast* и *Dmast*, определяющих значения выходов ведущих устройств на ОШ и сигнал *br*. В ходе своего функционирования этот блок анализирует значения сигналов *HBUSREQ, HLOCK* от ведущих устройств и значение сигнала *Mmacк* от блока контроля расщепленных транзакций. На основе значений этих сигналов блок определения ведущего устройства определяет ведущие устройства, которые являются собственниками линий адреса, управления и данных. В соответствии со значениями сигналов *selnewmast* и *gonewmast* определяются моменты времени, в которые происходит защелкивание номеров ведущих устройств – собственников шин.

Блок определения активного ведомого устройства формирует сигналы *HSEL* для всех ведомых устройств, а также сигнал *cSlave*, определяющих значения выходов ведомых устройств на ОШ. В ходе функционирования этих сигналов он анализирует значение, выставленное на шину адреса, в соответствии с чем блок определяет ведомое устройство, к которому обращается ведущее, владеющее линиями адреса и управления. По значению сигнала *gonewmast*, поступающему от блока определения конца запроса, определяются моменты времени, в которые происходит защелкивание номера ведомого устройства – собственника шины.

Блок контроля расщепленных транзакций определяет моменты времени начала и завершения расщепленных транзакций. Он формирует сигнал *Mmacк*, определяющий номера ведущих устройств, которые участвуют в незавершенных расщепленных транзакциях. В ходе функционирования, этот блок анализирует значения сигналов *Dmast* от блока определения следующего ведущего устрой-

ства, а также HRESP – от ведомого устройства, владеющего шинами данных и подтверждения. На основе этих сигналов он определяет моменты начала расщепленных транзакций и ведущие устройства, участвующие в этих транзакциях. По сигналу *HSPLIT* блок контроля расщепленных транзакций определяет моменты завершения расщепленных транзакций.

Модуль аппаратного арбитра описан на *VHDL* как совокупность компонентов, сопоставляемым перечисленным выше блокам.

В качестве способа ввода описания проектируемой схемы на ПЛИС наряду с языком *VHDL*-1993 использовался и схемотехнический редактор [1, 5]. Ниже представлены фрагменты процессов компонента выбора ведущего ПМ аппаратным арбитром.

```
p_selmast: process (HBUSREQm, MMack)
variable amast: natural range 1 to 16;
begin
amast:=1;
for i in Nm downto 1 loop
  If HBUSREQm(i)='1' and MMack (i-1)='0' then amast:=i; end if;
end loop;
if amast/=0 then samast<=amast;
  else
  for i in Nm downto 1 loop
    if MMack(i-1)='0' then samast<=i; end if;
  end loop;
end if;
samast<=amast;
end process p_selmast;
p_lockDmast: process (RESETn, clk, HREADY, gonewmast, saum)
begin
  if RESETn='0' then Dd1mast<=2;
  else
if rising_edge(clk) then
  if HREADY='1' then
    if gonewmast='1' then Dd1mast<=saum; end if;
  end if; end if;   end if;
end process p_lockDmast;
p_lockmast: process (RESETn, clk, HREADY, gonewmast, selnewmast, sa-
mast)
begin
if RESETn='0' then AUmast<=1; saum<=1;
                HMASTLOCK<='0';HMASTER<="0001";
  else
    if rising_edge(clk) then
            if HREADY='1' then
                    if gonewmast='1' then HMASTLOCK<=intlock; end if;
                      if selnewmast='1' then
                              if samast>0 then AUmast<=samast; saum<=samast;
                                      else AUmast<=1;saum<=1; end if;
                                        if samast>0 then
intlock<=HLOCKm(samast);
```

```
        HMASTER<=conv_std_logic_vector(conv_unsigned(samast,4),4);
                                                    else intlock<=HLOCKm(1);
HMASTER<="0001"; end if;
                                        end if;  end if;  end if;   end if;
        end process p_lockmast;
        p_grant: process (AUmast)
        begin
        for i in 1 to Nm loop
        if i= AUmast then HGRANTm(i)<='1'; else HGRANTm(i)<='0'; end if;
        end loop;
        end process p_grant;
        p_BR: process(AUmast, HBUSREQm)
        begin
          BR<=HBUSREQm(AUmast);
        end process p_BR;
```

В качестве примера рассмотрим функционирование блока выбора следующего ведущего устройства. Ведущее устройство – кандидат на использование ОШ, выбирается каждый раз при изменении на линиях запроса шины или изменении сигнала *Mmack*, отражающего наличие расщепленных транзакций. Если *selnewmast*=’1', то по восходящему фронту сигнала тактирования кандидат на использование ОШ становится владельцем шины адреса и управления. Если *gonewmast*=’1’, то по восходящему фронту сигнала тактирования ведущее устройство, владеющее шинами адреса и управления, получает в свое распоряжение шину данных.

Внутри архитектурного описания используются следующие сигналы. Сигнал *samast* используется для хранения идентификатора ведущего устройства, выбранного для следующего запроса. Сигнал *intlock* используется для хранения информации о наличии блокировки в текущем запросе. Сигнал *saum* используется для хранения идентификатора ведущего устройства, которое в данный момент времени владеет линиями адреса и управления.

Процесс *p_selmast* используется для выбора ведущего устройства, которому будет предоставлена шина адреса и управления после завершения очередного запроса. Этот процесс выполняется каждый раз, когда происходит изменение на линиях запроса ОШ от ведущих устройств и изменение сигнала *Mmack*. Внутри процесса описана переменная *amast*, используемая при выборе ведущего устройства, которое будет использовать ОШ. Сначала этой переменной присваивается значение 0. Далее в цикле просматривается наличие запросов от ведущих устройств, начиная с последнего, имеющего самый низкий приоритет. При каждом выполнении цикла, если имеется запрос ОШ от ведущего устройства, а соответствующий разряд сигнала *Mmack*='0' (что указывает на отсутствие для данного ведущего устройства незавершенной транзакции), переменной *amast* присваивается значение идентификатора этого ведущего устройства. Таким образом, после завершения цикла в переменной *amast*: хранится идентификатор ведущего устройства, имеющего наивысший приоритет среди запросивших ОШ. Если значение *amast* осталось равным 0, – значит, в данный момент ни одно ведущее устройство не запрашивает ОШ. В этом случае ОШ должна быть предоставлена ведущему устройству по умолчанию. Однако возможна ситуация, когда для ведущего устройства по умолчанию существует расщеплен-

ная транзакция, не готовая к завершению. В этом случае ОШ ему предоставлена быть не может. Пусть, в этом случае, она предоставляется ведущему устройству, имеющему наивысший приоритет среди тех, для которых не существует незавершенных расщепленных транзакций. Для этого используется цикл, аналогичный предыдущему. После того, как выбрано ведущее устройство – кандидат на использование ОШ, его идентификатор сохраняется в сигнале *samast*.

Процесс *p_lockDmast* используется для защелкивания идентификатора ведущего устройства, становящегося собственником линий данных.

Процесс *p_ lockmast* используется для защелкивания идентификатора ведущего устройства, становящегося собственником линий адреса и управления. В этом процессе определяются также значения выходных сигналов *HMASTER* и *HMASTLOCK*. При приходе сигнала сброса, в качестве ведущего устройства по умолчанию, выбирается ведущее устройство с номером 1. Если *selnewmast*='1', то значение сигнала *samast* по восходящему фронту тактового импульса фиксируется в *saum* и *Aumast*. В соответствии со значением *samast* определяется значение сигнала *HMASTER*. Значение сигнала *HLOCK* от ведущего устройства, которое становится собственником линий данных и управления, фиксируется в сигнале *intlock*. При очередном запуске процесса, после того как это ведущее устройство станет собственником шины данных, значение сигнала *intlock* выдается на линию *HMASTLOCK*.

Процесс *p_grant* используется для определения значений выходных сигналов *HGRANT*. Эти значения определяются на основе сигнала *Aumast*.

Процесс *p_BR* используется для определения значения сигнала *br* – запрос шины того ведущего устройства, которое в данный момент владеет линиями адреса и управления. Этот сигнал необходим блоку определения конца запроса для работы с пакетными запросами переменной длины.

Временные диаграммы, полученные в ходе моделирования представленного кода, показаны на рисунке 2.

В результате проведенных исследований рассмотрен возможный варианты реализации аппаратного арбитра общей шины РВС. Описан состав предлагаемого устройства. Предложен вариант функциональной организации устройства в составе РВС, а также модуль, синтезированный в САПР *Web pack ISE*. Приведены временные диаграммы работы компонента выбора ведущего ПМ аппаратным арбитром и определения конца запроса аппаратного арбитра.

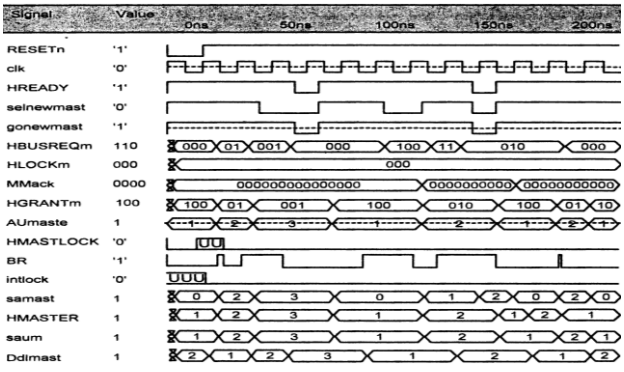


Рисунок 2 – Временная диаграмма работы компонента выбора ведущего ПМ аппаратным арбитром

Список литературы

1. *Зотов В.Ю. Проектирование цифровых устройств на основе ПЛИС фирмы XILINX в САПР WebPACK ISE. М.: Горячая линия-Телеком, – 2003. – 624с.*
2. *Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры. Изд. 2-е, перераб. и доп. Под общ. ред. И.А. Каляева. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, – 2009. – 344 с.*
3. *Левин И.И. Реконфигурируемые вычислительные системы с открытой масштабируемой архитектурой. Параллельные вычисления и задачи управления (PACO'2010): Труды Пятой Международной конференции (Москва, 24 октября-29 октября 2010 г.). М.: Учреждение РАН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, – 2010. – С.83-95.*
4. *Мартышкин А.И. Варианты реализации и структура аппаратного арбитра общей шины многопроцессорной системы // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – №2 (22). – С.195-204.*
5. *Суворова Е.А., Шейнин Ю.Е. Проектирование цифровых систем на VHDL. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 576 с. – ISBN 5-94157-189-5.*
6. *Таненбаум Э., Остин Т. Архитектура компьютера (6-е изд.), – СПб.: Питер, – 2013. – 816 с. – ISBN 978-5-496-00337-7.*
7. *Цилькер Б.Я., Орлов С.А. Организация ЭВМ и систем (2-е изд.), – СПб: Питер, 2011. – 688 с. – ISBN 978-5-49807-862-5.*

УДК 28.21.27
ББК 30

СОБЫТИЙНАЯ СИСТЕМА СИНХРОНИЗАЦИИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ MICROBLAZE

© ***А.В. Бурмистров***, *Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр «Атлас» (г. Пенза, Россия)*
© ***И.И. Сальников***, *Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

SYSTEM OF SYNCHRONIZATION OF MICROPROCESSOR SYSTEMS UNDER MANAGEMENT MICROBLAZE

© ***A.V. Burmistrov***, *Federal State Unitary Enterprise "Scientific-Technical Center "Atlas" (Penza , Russia)*
© ***I.I. Salnikov***, *Penza State Technological University (Penza, Russia)*

В статье описана событийная система синхронизации работы двух систем на кристалле под управлением программного микропроцессора MicroBlaze. Вместо полного дублирования используется синхронизация контрольных точек: прерываний и обращений по заданным адресам. Такой подход упрощает систему синхронизации и повышает ее быстродействие, т.к. отпадает необходимость в синхронизации каждой выполняемой команды.

Ключевые слова: система на кристалле, система синхронизации, дублирование, микропроцессор, *MicroBlaze, Xilinx*, ПЛИС, *IP*-ядро, *Verilog*, цифровой автомат.

In clause the system of synchronization of work of two systems on a crystal is described событийная under the control of the program microprocessor MicroBlaze. Instead of complete duplication the synchronization of control points is used: interruptions and обращений to the given addresses. Such

approach simplifies system of synchronization and raises its(her) speed, since disappears necessity for synchronization of each carried out team.

Key words: system on a crystal, system of synchronization, duplication, microprocessor, MicroBlaze, Xilinx, FPGA, IP-nucleus, Verilog, digital automatic device

Каждый год совершенствуется элементная база, появляются новые технологии и среды разработки цифровых устройств (ЦУ). Процесс разработки ЦУ становится проще, требования к функционалу аппаратуры выше, а перед инженерами появляются новые современные задачи, для решения которых часто все чаще используют ПЛИС [1]. Такой подход позволяет упростить систему, улучшить ее параметры и создать систему на кристалле (СнК), которая будет выполнять функции целого устройства и размещаться на одной интегральной микросхеме. Типичная СнК состоит из различных пользовательских модулей, готовых *IP*-ядер и одного или нескольких микропроцессоров (МП). Одни модули работают автономно в виде подсистем, а другие модули работают под управлением МП [2].

Существуют системы, к которым предъявляются особые требования по степени надежности и защищенности. Чтобы выполнить эти требования, нужно заставить несколько МП или управляемых ими IP-ядер работать синхронно. Задача усложняется, когда нужно синхронное выполнение процессов, которые выполняются в разных СнК. В статье описана событийная система синхронизации (СС) процессов в двух СнК под управлением МП *MicroBlaze* фирмы *Xilinx*.

Программный МП *MicroBlaze* [3] часто используется для разработки СнК на базе ПЛИС фирмы *Xilinx*. У этого МП есть специальная шина, с помощью которой можно соединить несколько МП и заставить их синхронно выполнять одну программу. Шина имеет большое количество сигналов, поэтому реализовать такой подход можно только в том случае, когда оба МП размещены на одном кристалле. Обеспечить синхронно выполнение процессов в СнК, которые размещены на разных кристаллах – это не простая задача, т.к. нужно учитывать время передачи сигналов между двумя ПЛИС, работающих на разных частотах.

Полное дублирование работы двух МП не всегда необходимо. Для синхронного параллельного выполнения процессов достаточно выделить только несколько точек для синхронизации. ВнашейСнК под управлением МП, таких точек будет две: обращение по определенному адресу и запуск прерываний.

Синхронизация обращений по адресам. Примем соглашение: модуль управляется МП и выполняет неделимую операцию. МП для управления модулями обращается к ним по их адресам. Другими словами, запуск модуля выполняется только тогда, когда МП по заданному адресу запишет определенный код. Таким образом, если в двух СнК синхронизировать обращение МП по заданным адресам, тогда будет обеспечено синхронное параллельное выполнение задач в модулях.

Синхронизация прерываний. Прерывания генерируются IP-ядрами и используются для запуска важных подпрограмм, выполнение которых зависит от данных в модулях. Важно, чтобы в разных СнК синхронно запускались одинаковые прерывания.

Чтобы обеспечить синхронное выполнение прерываний и обращений по заданным адресам, будем выполнять синхронизацию "окон". Окно – это момент времени от одного обращения МП к синхронизируемому адресу до другого. Начало окна означает, что в двух разных СнК МП обратились к синхронизируемым адресам для запуска одного и того же процесса.

Используя такой подход, может возникнуть ситуация при которой система "зависнет". Допустим, главная ПЛИС обращается по синхронизируемому адресу и ожидает, когда подчиненной ПЛИС сделает то же. А подчиненная ПЛИС тем временем получает запрос на прерывание и в процессе его выполнения обращается к другой синхронизируемой ячейки памяти. В этом случае система "зависнет". Выдавая прерывания только внутри окна или во время его начала, мы избежим "зависание" системы.

Описание системы синхронизации. Системы синхронизации главной и подчиненной СнК состоят из одинаковых блоков (рисунок 1) и отличаются логикой работы, т.е. цифровыми автоматами (рисунок 2-а, 2-б). Главная система синхронизации (ГСС) и подчиненная система синхронизации (ПСС) располагаются на разных кристаллах и обмениваются между собой информацией через модули приемников и передатчиков.

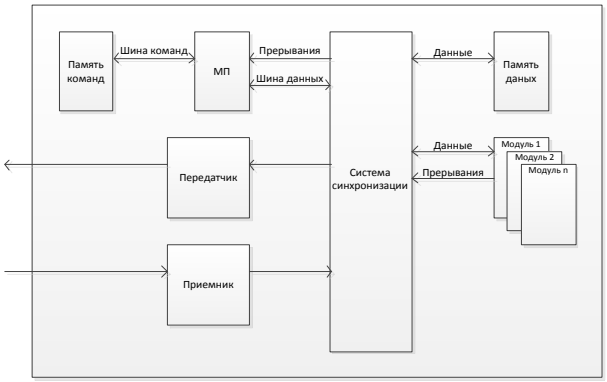
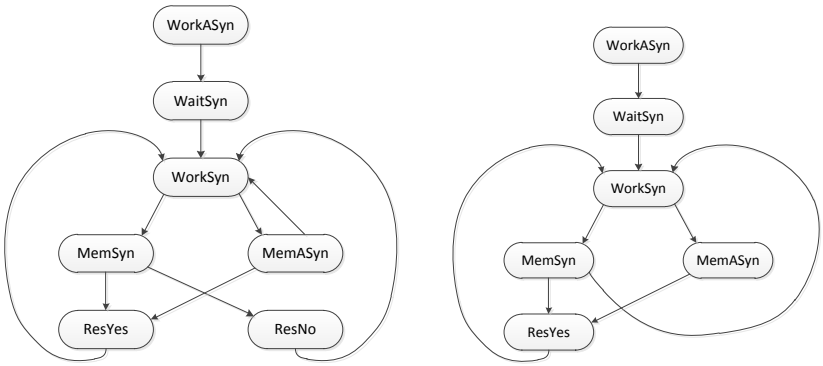


Рисунок 1 – Структурная схема микропроцессорной системы с синхронизируемыми событиями

Модуль СС "перехватывает" и управляет сигналами МП: прерываниями и ШД. Если МП в одной из СнК обратится по синхронизируемому адресу, тогда данные запомнятся и не передадутся далее модулям до тех пор, пока МП в другой СнК не обратится по тому же адресу. Запросы на прерывания от модулей сначала попадают в модуль СС, синхронизируются, а затем выдаются МП.



а) б)

Рисунок 2 – Цифровые автоматы ГСС (а) и ПСС (б)

Переход в синхронный режим. После включения питания или появления сигнала "сброс" СС начинает работать в асинхронном режиме, т.е. все прерывания от модулей и данные по ШД МП передаются без задержек. Когда МП обращается по адресу 0хА0000000h, тогда СС переходит в состояние ВайтСин и приостанавливает выполнение программы. Модуль ПСС сообщает об этом модулю ГСС. Когда обе СС окажутся в состоянии ВайтСин, тогда ГСС перейдет в синхронный режим и переведет в синхронный режим ПСС, передав ей команду "выполнить переход в синхронный режим".

После установки синхронного режима работы оба цифровых автомата переходят в состояние ВоркСин. При этом считается, что началось новое окно. Когда СС находится в состоянии ВоркСин, тогда данные на ШД МП передаются через модуль СС без задержек, тем самым обеспечивая нормальное выполнение программы.

Модуль ПСС постоянно отправляет в модуль ГСС информацию о состоянии цифрового автомата и полученных прерываниях.

Синхронизация окон без прерываний. Когда МП в одной из СнК обратится по синхронизируемому адресу, тогда автомат перейдет в состояние МемСин и выполнение программы приостановится, т.е. СС примет данные по ШД МП, сохранит их, но не передаст дальше модулям.

Модуль ПСС передаст об этом информацию в модуль ГСС. Когда обе СС окажутся в состоянии МемСин, тогда автомат в модуле ГСС перейдет в состояние РесНо, передаст команду "возобновить работу без прерывания" в модуль ПСС и выполнение программы возобновится, т.е. сохраненные на ШД данные передадутся модулям. Модуль ПСС, приняв команду "возобновить работу без прерывания" перейдет в состояние ВоркСин и возобновит выполнение программы.

Если модуль ПСС перейдет в состояние МемСин раньше модуля ГСС, тогда после перехода в состояние в МемСин модуль ГСС не отправит запрос в ПСС, а сразу перейдет в состояние РесНо.

Затем продолжится выполнение программы без задержек до появления очередного события.

Синхронизация окон с прерываниями. Модуль ГСС анализирует принятую из модуля ПСС информацию о прерываниях. Когда прерывание появляется в обеих СС, тогда цифровой автомат в ГСС переходит в состояние МемАсин, приостанавливает выполнение программы и передает в ПСС команду "приостановить работу".

Модуль ПСС принимает команду "приостановить работу" и выполняет ее. Если в это время не происходит обращение по синхронизируемому адресу, тогда выполнение программы приостанавливается и информация об этом отправляется в ГСС. Приняв эту команду, автомат в ГСС переходит в состояние РесЕс, выдает прерывание, передает в модуль ПСС команду "возобновить работу с прерыванием" и возобновляет выполнение программы. Модуль ПСС приняв команду "возобновить работу" переходит в состояние ВоркСин, выдает сигнал прерывания и продолжает выполнение программы. *Таким образом, оба МП начнут выполнение прерывания внутри окна.*

Если модуль ПСС во время выполнения команды "приостановить работу" перейдет в состояние МемСин, т.е. МП обратится по синхронизируемому адресу, тогда выполнение программы приостановится и информация об этом отправится в ГСС. Получится ситуация, когда прерывание возникло на границе

окна. В этом случает модуль ГСС перейдет в состояние ВокрСин, возобновит выполнение программы до момента обращения по тому же синхронизируемому адресу, а затем перейдет в состояние МемСин и приостановит выполнение программы. Когда обе СС окажутся в состоянии МемСин, тогда ГСС выдаст прерывание, возобновит выполнение программы и отправит в ПСС команду "возобновить работу с прерыванием". Модуль ПСС выполнит эту команду. *Таким образом, оба МП начнут выполнение прерывания после начала нового окна.*

Следует отметить, что ГСС отслеживает моменты входа и выхода из подпрограммы обработки прерывания. Поэтому, запрос на прерывание выдается только после завершения подпрограммы обработки прерывания.

Полное дублирование работы МП в двух СнК чревато значительным снижением быстродействия и усложнением системы. В большинстве случаев нет необходимости в синхронизации выполнения каждой команды, вместо этого достаточно синхронизировать только ключевые точки: прерывания и обращения по заданным адресам. В статье описана система синхронизации с таким подходом. Такая система универсальна, проста в реализации и обладает хорошим быстродействием.

Разрабатывалась СС для ПЛИС фирмы *Xilinx* и подразумевала использование МП *MicroBlaze,* но сделав небольшие изменения можно адаптировать ее под другой МП..

Список литературы

1. *Парфенов А.В., Чудинов С.М. Тенденции развития технологии вычислительной техники // Научные ведомости. Серия Экономика. Информатика – 2016. – №16. Выпуск 39.*
2. *Шагурин И. Системы на кристалле. Особенности реализации и перспективы применения // Электронные компоненты. – Издательский дом Электроника, 2009. – № 1.*
3. *https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/mb_ref_guide.pdf – MicroBlaze Processor Reference Guide Embedded Development Kit EDK 10.li.*
4. *Поляков А.К.Язык VHDL и VERILOG в проектировании цифровой аппаратуры. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 320с.*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 004.896
ББК 22

СЕМАНТИЧЕСКИЕ СЕТИ ФРЕЙМОПОДОБНОГО ВИДА КАК СПОСОБ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ДОКУМЕНТОВ

© ***Д.В. Блувштейн,*** *Управление Федерального казначейства по Костромской области (г. Кострома, Россия)*

SEMANTIC FRAME-LIKE NETWORKS AS A WAY OF KNOWLEDGE REPRESENTATION FOR THE CREATION OF SPECIALIZED DOCUMENTS

© ***D.V. Bluvshtein,*** *Federal Treasury Departments for the Kostroma region (Kostroma, Russia)*

В статье рассмотрено смешанное представление знаний с использованием семантических сетей фреймоподобного вида. В данном представлении знаний близкие понятия группируются, и между ними определяется смысл. Понятие может являться ссылкой на фрейм, в свою очередь слот фрейма может быть понятием. Это позволяет объединять знания, представленные в базе знаний используя алгоритмы получения различных модификаций элементов интеллектуальности при обработке естественного языка. Семантическая сеть диалога фреймоподобного вида контролирует процесс обработки запроса на естественном языке. Она содержит правила, которые обрабатывают правила и данные, из других семантических сетей фреймоподобного вида. По тексту формируется структурированная задача, что дает возможность работы с ней алгоритмов для получения на завершающем этапе специализированных документов.

Ключевые слова: алгоритмы, семантические сети фреймоподобного вида, естественный язык, правила, элементы интеллектуальности, специализированные документы.

The author briefly focuses on the mixed knowledge representation with the use of semantic frame-like networks. In this knowledge representation, related concepts are grouped together with the definition of meaning between them. A concept can refer to a frame; in turn, a frame slot can refer to a concept. This helps to bring together knowledge contained in the knowledge base using algorithms for obtaining various modifications of intellectual elements in the processing of natural languages. A semantic frame-like dialog network controls the processing of queries in a natural language. It contains rules that process rules and data from other semantic frame-like networks. A structured task is formed in the text, which makes it possible for algorithms to deal with it and obtain specialized documents at the final stage.

Key words: algorithms, semantic frame-like networks, natural language, rules, intellectual elements, specialized documents.

E-mail: bluvshteindv@gmail.com

В данное время существует острая необходимость в создании специализированных документов автоматизированным путем. Это связано с тем, что при создании электронного документа с помощью определенных алгоритмов можно получать более надежные документы с точки зрения правильности, точности, безопасности и т.д. за более короткое время. Алгоритмы в своей работе оперируют представлениями знаний из предметных областей, в которых используются специализированные документы.

Одним из основных способов представления декларативных знаний являются представления в виде фреймов и семантических сетей. Основное досто-

инство представления декларативных знаний в виде фрейма состоит в том, что элементы, описывающие объекты или события, группируются, из чего следует, что они могут обрабатываться как единое целое. Базовыми функциональными элементами семантической сети фреймоподобного вида служит структура из двух компонентов и связями между ними. Компоненты представляют собой некоторые понятия, а связи – отношения межу понятиями. Формализм в виде семантической сети фреймоподобного вида эффективен для решения ряда задач, в том числе обработки естественного языка. Относительная простота работы с семантическими сетями фреймоподобного вида – это наглядность представления знаний. Одно из преимуществ семантических сетей фреймоподобного вида перед другими схемами представления знаний заключается в том, что близкие понятия группируются. Соответственно, легко определить недостающие или ошибочные понятия в данном контексте, т.к. смысловой контекст определяется именно связями с соседними понятиями. Эти качества делают эффективным и достаточно простым смешанное представление знаний в виде семантических сетей фреймоподобного вида.

Семантическая сеть фреймоподобного вида – это объединение некоторых свойств семантической сети и фреймов. Она обладает следующими свойствами:

- состоит из множества списков нулевого уровня (СНУ);
- списки нулевого уровня содержат подсписки;
- количество подсписков ограничено по множеству типов, но неограниченно по их количеству;
- возможно добавление подсписков нового типа;
- каждый список имеет свое наименование.

Структура списка нулевого уровня имеет вид [1, с. 27]:

(Имя[_N] (НВ[_N] Описание) (КВ[_N] Описание) (ОТН[_N] Описание)).

Структура описания:

(ЗН[_N] ({v_1,…,v_{L1}})) (ОБОЗН[_N] (ЗН[_N] ({v_1,…,v_{L2}})))
(ПРИМ[_N] (ЗН[_N] ({v_1,…,v_{L3}}))) (КОМ[_N] (ЗН[_N] ({v_1,…,v_{L4}})))
(УТОЧН[_N] (ЗН[_N] ({v_1,…,v_{L5}}))) (АДРЕС[_N] (ЗН[_N] ({v_1,…,v_{L6}})))
(СИН[_N] (ЗН[_N] ({v_1,…,v_{L7}}))),

где v_i представляют собой либо значения, либо ссылки различного типа; НВ – список, указывающий начальную вершину; КВ – список, указывающий конечную вершину; ОТН – список, указывающий отношение между начальной и конечной вершинами; ЗН – значение, N – порядковый номер наименования. Списки более низкого уровня: ОБОЗН – обозначение, УТОЧН – уточнение, АДРЕС – ссылка на список нулевого уровня семантической сети фреймоподобного вида, ПРИМ – примечание, КОМ – комментарии, СИН – синоним.

Первый список в описании (ЗН ({v_1,…,v_{L1}})) характеризует один из объектов НВ, КВ, ОТН.

В базах знаний для определенной предметной области для решения различных задач могут использоваться различные семантические сети фреймоподобного вида.

Семантические сети фреймоподобного вида (СемСФрВ) наследуют основные виды семантических сетей, кроме этого появляются новые специфические СемСФрВ, такие как семантическая сеть задачи фреймоподобного вида (СемСЗ), семантическая сеть диалога фреймоподобного вида (СемСД) и т.д.

Все указанные виды списков могут рассматриваться как определенного вида фреймы. При этом наличие всех списков необязательно, оно диктуется по-

требностями описания различных ситуаций предметной области. Некоторые списки более низкого уровня могут входить в другие списки низкого уровня.

Например, в список (УТОЧН_1…) может входить список (ПРИМ_1…). Порядок следования списков произвольный, он может зависеть от степени их взаимосвязи и важности в данном СНУ.

В семантических сетях фреймоподобного вида расположена только символьная информация, представленная в виде текстов деловой прозы. При этом хранятся элементы интеллектуальности, которые применяются как при решении задач, возникающих в процессе диалога, так и при взаимодействии с пользователем.

Рассмотрим более подробно, каким образом такие элементы интеллектуальности как «понимание», «решение» и «анализ» отображаются в семантических сетях фреймоподобного вида.

Элемент интеллектуальности «понимание» может быть зафиксирован в следующих семантических сетях фреймоподобного вида: семантическая сеть определений фреймоподобного вида (СемСО), семантическая классификационная сеть фреймоподобного вида (СемКлС), семантическая каузальная сеть фреймоподобного вида (СемКаузС), семантическая функциональная сеть фреймоподобного вида (СемФС), СемСД. Составными понятиями, через которые определяется «понимание», являются «установление связей», «новые свойства объекта», «операциональный смысл» [2]. Элемент интеллектуальности «понимание» определяется также через понятия «компонент мышления», «структура мыслительной деятельности», которые имеют отношение в настоящее время только к субъекту «человек».

Понятие «установление связей» может быть отображено в СемСО, СемКлС, СемКаузС.

Понятие «новые свойства объекта» может быть отображено в СемСО, СемКлС.

Понятие «операциональный смысл» может быть отображено с помощью СемСО и СемФС.

Элемент интеллектуальности «решение» определяется через понятия «процесс выполнения действий», «достижение цели», «проблемная ситуация».

Понятие «процесс выполнения действий» отображается с помощью СемСО, СемФС.

Понятие «достижение цели» отображается с помощью СемКаузС и СемФС.

В СемКаузС отношение между начальной и конечной вершинами является причинным, в первой вершине формулируется причина, во второй следствие. В наблюдаемых явлениях и проводимых экспериментах часто фиксируют причины и следствия, но эта связь может быть и случайной. Тогда для доказательства истинной связи требуются как дополнительные эксперименты, так и теоретическое обоснование. При теоретическом обосновании причина, зафиксированная в начальной вершине, является условием, а следствие – целью, к которой надо прийти в цепочке обоснований. Если теоретически связь между причиной и следствием доказывается, то она становится истинной, что отображается в подсписках ПРИМ, ПОЯСН списка нулевого уровня.

Рассмотрим пример:

(СемКаузС_1 (НВ (ЗН (натуральное число делится на 8))) (КВ (ЗН (натуральное число является четным))) (ОТН (ЗН (причинно-следственная связь)) **(ПРИМ(ЗН(отношение истинное))))**.

Понятие «проблемная ситуация» отображается с помощью СемСЗ и СемФС.

В СемСЗ «проблемная ситуация» обычно отображается следующим образом. В начальной вершине и в подсписках, содержащихся в этой вершине, описываются условия, в конечной вершине и в ее подсписках описываются цель или несколько целей. Отношение устанавливается в списке ОТН.

СемФС отличается от СемСЗ тем, что условия и цели описываются в более конкретном и формализованном виде, а также требуется дополнительно найти множество списков, содержащихся в остальных СемСФрВ для составления плана решения и реализации решения. Это обычно реализуется с помощью таких СемСФрВ, как абстрактная семантическая функциональная сеть фреймоподобного вида (АСемФС), которая является общим планом решения и конкретная функциональная сеть фреймоподобного вида (КСемФС), которая содержит конкретный путь решения.

Рассмотрим примеры:

(СемСЗ_1 (НВ(ЗН_1(известна строка символов СТР1 «A153B42FD4»)) (ЗН_2(алгоритм получения пароля: последовательность символов «B4» в СТР1 заменить на «B52» получить строку СТР2; в строке СТР2 удалить все трехзначные десятичные числа и получить пароль)))(КВ(ЗН(пароль из строки символов СТР1)))(ОТН(ЗН(получить пароль из исходной строки)))).

(СемФС_1(НВ(ЗН_1(“A153B42FD4”)))(КВ(ЗН(Algoritm: [[СТР1:1) “B4” → “B52”]:1)Del(nnn:(n∈{1…10})]))(ОТН(ЗН(Получить))))

Элемент интеллектуальности «анализ» определяется через понятия «выделение», «часть объекта», «изучение». Понятия отображаются с помощью СемСО, СемКлС, АСемФС, КСемФС.

В СемСО содержатся законы, расшифровка терминов, определение понятий и процессов. Определение закона в НВ содержит название закона, в КВ формульная или текстовая формулировка. Расшифровка термина содержит в НВ наименование термина, в КВ – его определение. Определение понятия в НВ содержит наименование понятия, в КВ – его формульную или текстовую формулировку, аналогично определяется процесс. Из приведенного краткого анализа знаний содержащихся в СемСО следует, что обычно в НВ содержится наименование, а КВ – определение. Следовательно, для объектов можно установить его составные части.

СемКлС предполагает, что в начальной вершине находится родовой объект, а в КВ находятся видовые определения.

АСемФС и КСемФС позволяют план и решение задачи разбить на несколько процессов.

Понятие «изучение» тесно связано с понятием «понимание» и «иллюстрация». Если выделены составные части, то с помощью СемСО, СемКлС, АСемФС, КСемФС, можно получить о них знания.

Все элементы интеллектуальности рассматривались с точки зрения, с помощью каких понятий более низкого уровня они определялись. Это связано с тем, что такой подход позволяет объединять эти понятия в виде связей в СемСФрВ с целью получения различных модификаций элементов интеллектуальности.

Семантические сети фреймоподобного вида предназначены для описания объектов, процессов, предметов любой природы.

Существуют такие объекты, как задача и концептуальная модель некоторой предметной области. Задача является объектом, задающим процесс решения, со-

здания, узнавания и т.д. Концептуальная модель задает сущности и отношения между ними. Работа семантических сетей фреймоподобного вида с подобными объектами определяет направление решения задач и получение результатов.

Основные этапы технологии работы с семантическими сетями фреймоподобного вида следующие.

1) Анализ задачи.

2) Переписывание формулировки задачи в форме, удобной для записи в СемСЗ.

3) Запись формулировки задачи в СемСЗ.

4) Выявление или добавление информации в СемСО, связанной с данной задачей.

5) Использование СемСД.

6) Используя СемСФрВ (при необходимости предварительно создав АСемФС и КСемФС) построение СемФС для данной задачи.

Имеется большое количество типов задач: математические, информационные, логические, физические, инженерные, геометрические и т.д. При действиях, требующих знаний относительно конкретной задачи, в СемСД должны храниться знания о том, к какому методу или модулю приложения надо обратиться для того, чтобы ответить на определенный вопрос. В этом случае в семантической сети диалога фреймоподобного вида должны храниться знания не только о видах правил и способов работы с ними, но и об этапах решения конкретной задачи и о способах взаимодействия на каждом этапе. В самой СемСД накладно хранить сведения о различных правилах и способах работы с ними, значит должны иметься способы обращения к ресурсам, хранящим эти сведения.

Отметим три вида задач:

- задачи, которые не требуют взаимодействия с пользователем, т.е. все знания о ее решении хранятся в БЗ;
- задачи, которые требуют взаимодействия с пользователем, которые ориентированы на конкретные условия и ограничения;
- задачи, которые относительно автономны применительно к знаниям для их решения, но в некоторых ситуациях обращающиеся к пользователю для определения пути решения.

Для процесса диалога наиболее важны задачи второго типа, они требуют постоянного взаимодействия с пользователем. На самом деле задачи первого типа можно свести к задачам второго типа и наоборот.

Задачи третьего типа не сводимы к задачам ни первого, ни второго типа, потому что в настоящее время не созданы модули искусственного интеллекта, способные к самостоятельному принятию решений во всех случаях. Это требует наличия большого количества знаний и способности владения ими в творческих ситуациях.

СемСД содержит только правила, которые могут обрабатывать правила и данные, содержащиеся в других семантических сетях фреймоподобного вида.

Семантические сети фреймоподобного вида, кроме СемСД и СемФС, могут в СНУ содержать данные. Все семантические сети фреймоподобного вида в некоторых своих подсписках могут содержать данные. В общем виде алгоритм работы с помощью семантической сети диалога фреймоподобного вида сводится к тому, что в ней для задачи содержится сценарий, указывающий, с чего надо начать и какой результат нужно получить. Промежуточные результа-

ты получаются, и учитываются с помощью других семантических сетей фреймоподобного вида.

Общий алгоритм можно представить таким образом.

СемСД_1) Нахождение описанного сценария задачи в СемСД.

СемСД_2) Если сценария не найдено, то перейти на СемСД_EOJ.

СемСД_3) Определение по начальным данным, к каким ресурсам надо обращаться.

СемСД_4) Если необходимо получить данные от пользователя, то определить тип запроса, организовать элемент диалога для получения данных.

СемСД_5) Если в результате процесса элемента диалога данные не получены, то перейти на СемСД_EOJ.

СемСД_6) Если данные получены, то определение с помощью ресурса СемФС следующего действия.

СемСД_7) Если в процессе выполнения действия необходимо получить данные от пользователя, то определить тип запроса, организовать элемент диалога для получения данных.

СемСД_8) Если в результате процесса элемента диалога данные не получены, то перейти на СемСД_EOJ.

СемСД_9) Если в процессе выполнения действия необходимо передать данные пользователю, то определить и организовать элемент диалога для передачи данных.

СемСД_10) Определение, получен ли результат. Если результат получен, то перейти на СемСД_EOJ.

СемСД_11) Если результат не получен, то определение вида ресурсов, к которым надо обратиться для получения данных и перейти на СемСД_4.

СемСД_EOJ) Закончить работу.

В семантической функциональной сети фреймоподобного вида вершинами являются объекты, явления, процессы, а связи между вершинами являются функциональными отношениями. Важнейшая особенность СемСФрВ – это возможность наследования свойств, то есть какая-либо одна вершина СемСФрВ может заимствовать, наследовать свойства, приписанные другой вершине и/или являться ссылкой (названием) на какой-либо фрейм. При необходимости результаты работы фреймов изменят (дополнят и т.п.) соответствующие вершины СемСФрВ.

Фреймы, используемые в семантических сетях фреймоподобного вида, позволяют создавать базу знаний. Общий пример структуры фрейма:

(In. **Расчет_1**
(Псевдонимы_фрейма Площадь вписанного в треугольник прямоугольника)
(Структура (In. **Расчет**
(Псевдонимы)
(Структура)
(Активность)
(Задачи)
(Входной_канал_1
(Длина основания треугольника равна A)
(Площадь треугольника равна S)
)
(Входной_канал_2)
(Процессы)

```
        (Выходной_канал_1)
        (Выходной_канал_2)
      )
      (Активность ((Входной_канал_1 = 1) (Входной_канал_2 = 0)))
      (Задачи ((Определение минимальной площади вписанного в треугольник прямоугольника))
      (Входной_канал_1
        Прием данных по задаче определения Площади прямоугольника с клавиатуры
        (Прием основания треугольника A)
        (Прием площади треугольника S)
        )
      )
      (Входной_канал_2
       Прием данных по всем задачам из базы данных
      )
      (Процессы
        ((Внешнее_представление (Calculation_S: Расчет Площади вписанного в треугольник прямоугольника))
        ((c:\ras\Calculation_S.adl))(((t)(S))Ф1)(((Ф1)(S)()))
       )
    …….
      (Выходной_канал_1
        Выдача данных по задаче определения Площади прямоугольника на монитор
    …….
       )
      )
    )
```

Фрейм является с одной стороны пассивной частью хранящей знания с другой стороны активной частью инициализирующую фрейм или программу. Из примера также видно, что каналы предназначены для постоянного приема или выдачи информации вне зависимости от активности фрейма, а прием от источников или выдача получателям зависят от активности процессов. Данная структура фрейма планировалась только для применения в области обработки текстов на естественном языке.

Для того чтобы найти решение с помощью СемФС, надо привлечь решатель или машину вывода для СемФС. Семантическая функциональная сеть фреймоподобного вида содержит много информации, которую надо обрабатывать с помощью машины вывода. При работе с любыми семантическими сетями фреймоподобного вида для машины вывода нужно указать начальные условия и желаемый результат или, по крайней мере, конечные условия или ограничения.

Для семантической функциональной сети фреймоподобного вида желательно представить задачу в СемСЗ, в крайнем случае, общую информацию.

Из сказанного следует, что машина вывода (МВ) должна состоять из двух компонент: компонента, которую можно применять для любой семантиче-

ской сети фреймоподобного вида; компонента, которая является специфической для конкретной семантической сети фреймоподобного вида.

Общая компонента предназначена для работы с любым видом семантических сетей фреймоподобного вида, она выполняет ряд функций:

- отбор СНУ, удовлетворяющих определенным условиям;
- применение методов построения цепочек правил.

Специальная компонента предназначена для работы с конкретными семантическими сетями фреймоподобного вида, с помощью которых можно решать задачи. Функции специальной компоненты подобны функциям общей компоненты.

Машина вывода, используя исходные данные из рабочей памяти, БД и знания из БЗ, формирует последовательность правил, которые оперируя исходными данными, позволяют получить конечный результат.

Интерфейс с элементами интеллектуальности связан с БЗ, содержащей семантические сети фреймоподобного вида. Процесс диалога организуется с помощью СемСД.

Таким образом, в статье рассмотрены некоторые аспекты модели человеко-машинного диалога с элементами интеллектуальности. Приведен способ представления знаний с помощью семантических сетей фреймоподобного вида. Кратко показан процесс работы семантических сетей фреймоподобного вида. Формирование и структурирование задачи по заданному тексту с использованием упрощенных, обобщенных алгоритмов работы с некоторыми семантическими сетями фреймоподобного вида.

Список литературы

1. *Блувштейн Д.В., Зубков В.П. Автоматизация и современные технологии. М.: Машиностроение, Автоматизация и современные технологии, 2010.*
2. *Тихомиров О.К. Структуры мыслительной деятельности человека. М.: МГУ, 1969. 304 с.*

УДК 681.518
ББК 22

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ И ВАРИАНТЫ МАКЕТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СБОРОЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

© ***Р.А. Бурнашев***, *Казанский (Приволжский) федеральный университет (г. Казань, Россия)*
© ***М.А.А. Аль-Саеди***, *Казанский (Приволжский) федеральный университет (г. Казань, Россия)*
© ***Д.Н. Галанин***, *Казанский (Приволжский) федеральный университет (г. Казань, Россия)*
© ***В.О. Георгиев***, *Казанский (Приволжский) федеральный университет (г. Казань, Россия)*

CONCEPTUAL BASIS FOR DEVELOPING OF TRAINIG MODELS OF COMPLEX SYSTEM SOFTWARE ASSEMBLING GENERATOR

© ***R.A. Burnascev***, *Kazan (Volga region) Federal University (Kazan, Russia)*
© ***M.A. A.Al-Saedi***, *Kazan (Volga region) Federal University (Kazan, Russia)*
© ***D.N. Galanin***, *Kazan (Volga region) Federal University (Kazan, Russia)*
© ***V.O. Georgiev*** *Kazan (Volga region) Federal University (Kazan, Russia)*

В статье представляются разработанные в ходе практических работ по учебным курсам «Проектирование и архитектура программных систем» и «Объектно-ориентированный анализ и проектирование» концептуальные основы построения учебно-макетных вариантов интерактивной сборочной системы, осуществляющей в автоматическом режиме сборку программных систем прикладного назначения. Система предназначена для наглядной практической демонстрации содержания основных этапов и работ при разработке сложных, критических программных средств. Приводится несколько макетных реализаций системы.

Ключевые слова: генератор программного обеспечения, интерактивная система

This paper presents conceptual basis for developing of training models of interactive assembling system for automatic building of application software systems, obtained during practical works over “Design and architecture of software systems” and “Object-oriented analysis and design” courses. The system is intended for practical demonstration of basic stages and operations in development of complex and critical software. This also includes a consideration of solutions for some substantial problems of complex systems software generation, such as: program module compatibility, formalization of computer interaction and choosing of formal model for human machine interface. In addition, several training model implementations are provided.

Key words: software generator, training models, interactive systems

В статье представляются разработанные в ходе практических работ по учебным курсам «Проектирование и архитектура программных систем» и «Объектно-ориентированный анализ и проектирование» (методическое пособие [1]) концептуальные основы построения учебно-макетных вариантов интерактивной сборочной системы, осуществляющей в автоматическом режиме (с предварительной интерпретацией и анализом фрагментов программных кодов) сборку программных систем прикладного назначения, с целью кодовой иллюстрации основных положений учебных курсов «Программной инженерии».

Представляемые макетные варианты системы предназначены для наглядной практической демонстрации содержания основных этапов и работ при разработке сложных, критических программных средств. К основным

этапам будут отнесены: проектирование и управление проектом (административное, автоматическое или автоматизированное), тестирование создаваемой системы, ее документирование, оценка качества, оценка стоимости.

Сборка осуществляется в интерактивном взаимодействии с пользователем, идущем на профессиональном языке общения. Профессиональный язык общения построен на основе понятия интеллектуального интерфейса и реализуется на основе сочетания жестко запрограммированного диалога (на «верхнем» уровне перехода от одного этапа к другому) и «свободного» сценарного диалога общения (на «нижних», «внутриэтапных» уровнях).

Программная реализация сценарного диалога построена на основе макетного кодового представления основных формальных моделей интерактивных диалоговых систем человеко-машинного взаимодействия, один из примеров такой программной реализации представлен в [2].

Сборка может осуществляться в нескольких режимах:

1. Режим исходных кодов;
2. Режим исполняемых кодов;
3. Сочетание исходных и исполняемых кодов.

Генерация программных систем построена на основе использования концепций «Теории схем программ», ее базисных понятий типовых конструкционных схем и методологий программной инженерии. Программная реализация системы сделана в нескольких вариантах, в зависимости от того какая формальная модель сценария диалога заложена. В качестве формальных моделей выделены: графовая (автоматная) модель, модель на основе функциональных сетей Петри, модель на основе семантических сетей, модель на основе реляционных данных, модель на основе теории формальных языков, вероятностная модель, модель на основе теории игр, тензорная модель и некоторые другие модели.

Реализация систем выполнена на основе использования основных инструментальных средств языковых сред C# и Java.

При проектировании такого ПО как сборочный генератор сложных систем, который сам представляет собой сложную программную систему, возникают многочисленные задачи, требующие оценки количественных и качественных закономерностей процессов функционирования системы. В общем смысле – это задачи моделирования. На этапах разработки технического и рабочего проектов систем, модели отдельных подсистем детализируются, и моделирование служит эффективным инструментом для решения конкретных задач проектирования, т. е. выбора оптимального варианта (из множества допустимых) решения задачи по определенному критерию, при заданных ограничениях. При моделировании сложных систем необходимо учитывать следующие их особенности:

- сложность структуры и запутанность связей между элементами, неоднозначность алгоритмов поведения при различных условиях;
- большое количество параметров и переменных, неполнота и недетерминированность исходной информации;
- разнообразие и вероятностный характер воздействий внешней среды.

Одним из систематических, дисциплинированных, измеримых подходов в программной инженерии к разработке программных систем можно назвать макетно-модельный подход, основанный на технологических принципах, рассмотренных в работах [3, 4].

Макетно-модельный подход. Суть макетно-модельного подхода* составляет использование методологии механизма теории схем программ, с выделением

типовых схем функционального взаимодействия элементов ПО с полной или частичной формализацией их функционирования и программной реализацией макетных моделей элементов ПО. При практической программной реализации используется метод, суть которого в выполнении следующих этапов.

1) Определение цели задачи и углубление в существо задачи.

2) Установление подцелей и разбиение задачи на подзадачи.

3) Выявление специфических особенностей разрабатываемого для решения задачи программного обеспечения.

4) Поиск эксперта, специализирующегося в области, к которой относится задача и получение его согласия на помощь в разработке системы.

5) Работа вместе с экспертом над несколькими экспериментальными примерами прикладных задач, которые должна решать разрабатываемая программная система.

6) Выбор программных средств, необходимых для создания системы. Это выбор зависит от типа решаемой задачи, финансовых возможностей и сложности программного обеспечения.

7) Выбор технологических средств, на которых будет работать программный инструментарий, приобретение инструментальных средств.

8) Построение лабораторного прототипа системы, позволяющего успешно справляться с примерами задач, решенных в пункте (5).

9) Проектирование системы при участии эксперта. Выявление сущностей, взаимосвязей между ними, виды иерархий, классов.

10) Выполнение необходимого числа итераций разработки системы с испытанием в реальных практических условиях.

11) Разработка документации к системе.

С первых шагов реализации проекта необходимо стремиться к построению хотя бы ограниченной по возможностям, но правильно работающей макетной модели для улучшения взаимодействия с экспертом, для чего и используется макетно-модельный подход.

Макет на основе модели, использующей принципы теории игр. Эта модель не является самой распространенной формальной моделью по причине того, что основные понятия теории диалоговых игр, которые в ней используются, известны только в узких кругах. Однако это модель достаточно проста в использовании и имеет немало сходств с наиболее распространенной автоматной моделью. Описанный далее макет модели основан на статье [5].

Теория диалоговых игр – это попытка учесть идеи сценарных моделей и диалоговых грамматик в одной структуре. Предполагается, что диалоги состоят из череды так называемых игр. Каждая игра составлена из последовательности ходов, которые возможны в соответствии с набором правил (похожих на грамматики), и вся игра запланирована участвующими агентами (как в модели основанной на сценариях). Таким образом, агенты совместно используют знания (представления и цели) в ходе диалога, и игры могут быть вложенными (возможны поддиалоги) для достижения подцелей. В этой структуре ходы часто приравниваются к речевым актам. Модель довольно формально определяет ходы, допустимые для каждого из участников в данный момент игры (по правилам и в соответствии с целью) и таким образом, моделируются диалоги. Для задания требований к диалоговой системе вводятся следующие определения.

Игровая доска определяется двумя ее частями: общая доска и личные доски.

- Общая доска. Принято представлять диалог, как взаимодействие на общей доске. Эта доска содержит упорядоченную историю ходов, идентификатор игры со связанными правилами, которые были известны до начала или стали известны в процессе диалога.
- Личная доска – личные представления каждого игрока, неизвестные другим. Это в частности предполагает игру с неполной информацией.

Ход – базовое действие игрока в игре, и оно имеет цену. Шагом игры называется интервал между двумя ходами. Игрок, который должен ходить – активный.

Когнитивный контекст – состояние личных досок и совместно принятые факты на публичной доске.

С каждым шагом игры меняется ее когнитивный контекст из-за добавления или удаления фактов на игровой доске. В этом отношении это понятие может быть отнесено к акту диалога. Формально акт диалога определен как коммуникативная функция, примененная к содержательным высказываниям. Также вводится пустой ход. Этот ход не влияет на когнитивный контекст игры, но увеличивает счетчик ходов, как любое диалоговое действие.

Структуру комплекса составляют две части: генератор сценариев и диалоговая система. В практической реализации модель выглядит следующим образом:

- Имеется история диалога, в которой хранятся все фразы системы и ответы пользователя.
- Имеется функция, принимающая в качестве аргумента историю диалога и возвращающая множество допустимых ходов. Эта функция определяет так называемые правила игр.
- Каждый речевой акт заносится в историю. Если какой-то шаг не удовлетворяет правилам игры, то состояние игры откатывается на шаг назад.

Создание сценария, построенного на основе модели теории игр начинается добавлением вопросов и прочей информацией и завершается созданием конфигурационного документа сценария. Эксперт заполняет текст вопроса, правила в таблице, переход на другой сценарий диалога, справку и сообщение об ошибке. Если оставить поле «Переход» пустым, то при соответствующем ему ответе система автоматически перейдет к следующему вопросу (игрок в таком случае совершает "пустой ход").

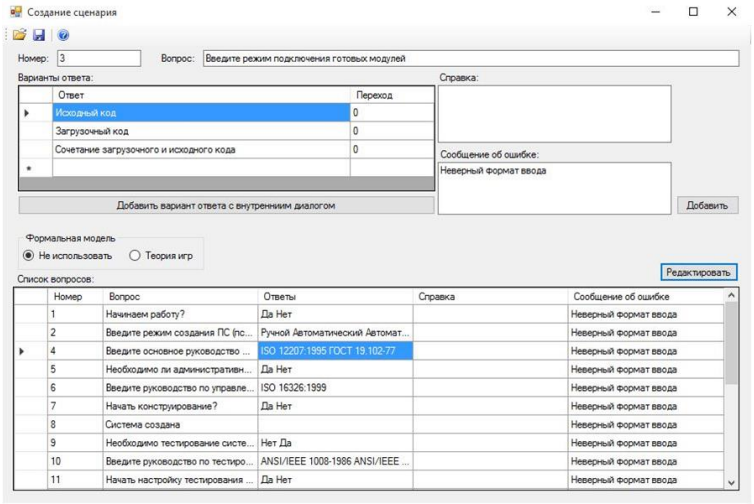


Рисунок 1– Макет модели на основе теории игр: интерфейс создания сценария

После выполнения этих действий созданный файл можно открыть самой диалоговой системе. Пользователю предлагается пройтись по сценарию диалога и ответить на вопросы. Исходя из ответа пользователя, система переходит в необходимое состояние и записывает результаты.

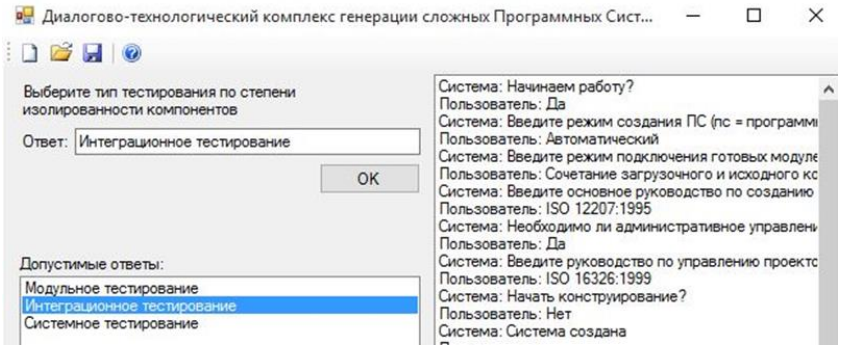


Рисунок 2 – Макет модели на основе теории игр: интерфейс диалога с пользователем

Макет на основе графовой модели. Графовая (автоматная) модель является одной из доступных и понятных моделей для реализации программных систем. Граф – основной объект изучения математической теории графов, совокупность непустого множества вершин и наборов пар вершин (связей между вершинами).

Структуру макета составляют две части: реализация модели с заданными свойствами с помощью, так называемого, генератора сценария и применение построенного сценария в диалоговой системе. В качестве прототипной практической реализации графовой (автоматной) модели модель будет выглядеть следующим образом.

- Каждой вершине графа соответствует вопрос диалога.
- Каждому переходу в графе соответствует один из возможных вариантов ответов на вопрос, что по сути предоставляет нам возможность перемещаться в любые доступные состояния.
- Каждому вопросу, аналогично вершине графа, присваивается некоторое состояние.

Создание сценария, построенного на основе графовой (автоматной) модели начинается с создания пустого документа в формате *.xml*. Для записи данных состояния (вершины) графа используется поле «Вопрос», в которое записывается текст вопроса. Граф реализован таблицей с полями «Варианты ответов», «Переход в состояние». После заполнения формы необходимо нажать кнопку «Добавить вопрос». Путем таких последовательных действий с указанием номера перехода на определенное состояние для каждого варианта ответа на вопрос можно сформировать файл, в котором хранится сценарий, построенный на основе модели.

После выполнения этих действий можно открыть заполненный файл сценария в главном окне программы. После таких манипуляций пользователю предлагается пройтись по сценарию диалога и ответить на вопросы. Исходя из ответа пользователя, система переходит в необходимое нам состояние и записывает результат в «Ход диалога». В ходе диалога присутствует анализатор

ошибок, который выводит в поле «Сообщение об ошибке» информацию пользователю о том, что он ввёл неверный ответ и система вновь просит его ответить на вопрос, выбрав один из предложенных вариантов ответа.

Макет на основе модели, использующей сетевое представление в виде тензорной сети. Модель, использующая тензорное сетевое представление была описана в свое время в книге [6], и данное описание взято за основу для создания макета модели. Задача построения информационной системы ставится как задача сети. Имеется сеть, состоящая из совокупности одномерных симплексов. На сеть воздействуют некоторыми величинами. Необходимо определить величины откликов, создаваемых сетью. Задание на сети различных систем координат, переход от одной координатной системы к другой и проецирование инвариантного объекта в различные системы координат дает возможность управления сетью.

Формальное определение сети можно дать так: на счетном множестве M задано бинарное отношение R как подмножество $M \times M$:

$$R \in M \times M, \qquad x \in M,\ y \in M,\ (x,y) \in R. \tag{1}$$

где ***(x, y)*** – упорядоченная пара.

Сетью называется система (множество одномерных симплексов), вершинам и ребрам которой поставлены в соответствие некоторые величины, т. е. определены функции:

$$f_1: M \to x, \qquad f_2: S \to y. \tag{2}$$

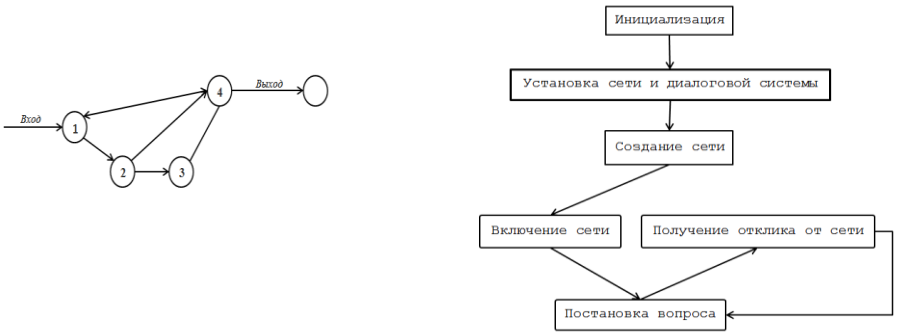
Отображения, сохраняющие математические структуры на множествах, позволяют сопоставить между собой различные пространства, найти среди них изоморфные или согласованные в более слабом смысле. Множество всех отображений представляет новое множество, отличное от исходных множеств, его называют функциональным пространством. Использование функционального пространства позволяет строить множества (системы) с нужными свойствами или структурами.

Модель информационной системы представляется в общем случае в виде сети, вершинам соответствуют домены (множество данных одного типа), а ветвям – преобразования между данными. Сеть представляет собой структуру, в которой имеются как замкнутые, так и разомкнутые пути. Эта структура, образованная из ветвей и узлов, рассматривается как одномерный комплекс.

В случае диалоговой системы узлами сети будут вопросы, а дуги преобразованиями системы то есть переходами от одной системы координат в другую. Сеть задается тензором банка данных который хранить в себе все сущности и их связи. Задание вопроса можно сравнить с вычислением функции в зависимости от ответа выполняется переход к следующему узлу сети, а если для данного ответа нет функции перехода, то она определяется исходя из топологии сети. Для каждого вопроса нужно определить множество пар <ответ, переход> если пары не будут переход будет определен из топологии сети (рисунок 3).

В ходе работы был разработан программный комплекс, состоящий из: редактора сценариев и диалоговой системы.

Эксперт вводит вопрос системы, настраивает тип ответа от пользователя, выбирает узлы, в которые происходит переход при выборе того или иного варианта и ответное сообщение системы. Все введенные данные проверяются на корректность.



а) б)

Рисунок 3 – Схема сети диалоговой системы (а), схема работы программы (б)

Диалоговая система состоит из одной формы, на которой меняются вопросы, также могут появляться всплывающие сообщения, если в них есть необходимость.

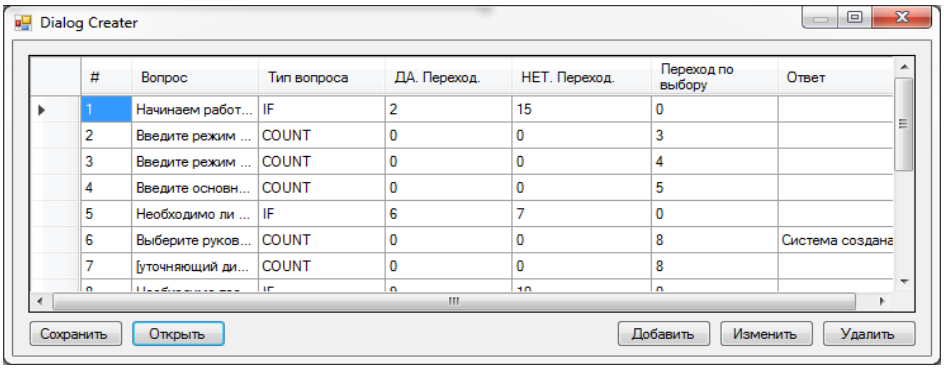


Рисунок 4 – Макет модели на основе тензорной сети: интерфейс редактора сценариев

Таким образом, представлены концептуальные основы построения генератора ПО сложных систем как сложной системы с макетно-модельным подходом к разработке, позволяющим в краткие сроки получать базовый макет системы, пригодный для дальнейшего итеративного расширения, для тестирования и для учебных целей.

Список литературы

1. *Георгиев В.О., Поликашин Д.С., Рафиков Д.С., Бурнашев Р.А., Прокопьев Н.А. Учебно-макетный вариант инструментальной системы «Преобразователь кода «TCJ «Сборник // Языки программирования и компиляторы – 2017: труды конференции / Южный федеральный университет; под ред. Д.В. Дуброва – Ростов-на-Дону: Издательство Южного Федерального университета, 2017. – 282 с. ISBN 978-5-9275-2349-8. с. 75-78.*
2. *Георгиев В. О. Учебно-модельный вариант интерактивной системы генерации ПО сложных систем, с предварительной прединтерпретацией программных модулей // Материалы XXII Международной научно-технической*

конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2016)». 2016 г. с. 248-249.

3. *Георгиев В.О. Программная инженерия: технологические принципы разработки программного обеспечения на уровне формализованного описания, на примере абстрагированной диалоговой системы // Материалы трудов международной конференции TEL'2014 «Языковая семантика: модели и технологии». 2014 г. с. 40-41.*
4. *Georgiev V. O., Prokopiev N. A. Model Approach To Interactive System Software Development // International Journal of Applied Engineering Research (IJAER). 2015. v. 10. № 24. pp. 45208-45213.*
5. *Maudet. N., Evrard. F. A Generic Framework For Dialogue Game Impementation // Proceedings of 2nd Workshop on Formal Semantics & Pragmatics of Dialogue. 1998. pp. 185-198.*
6. *А. Е. Арменский. Тензорные методы построения информационных систем. Москва: «Наука», 1989. 152 с.*

УДК 004.415.2.043

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ – ПЛАТФОРМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ОПОРЫ ИЗЫСКАТЕЛЬСКИМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ

© ***Н.А. Котов,*** *Университет ИТМО (г. Санкт-Петербург, Россия)*
© ***В.И. Погорелов****, Университет ИТМО (г. Санкт-Петербург, Россия)*

STRUCTURAL SCHEME OF THE WEB APPLICATIONS – PLATFORMS OF THE AUTOMATED SYSTEM FOR OBTAINING THE GEODESIC SUPPORT BY THE SURVEY ORGANIZATIONS

© ***N.A. Kotov****, ITMO University (St. Petersburg, Russia)*
© ***V.I. Pogorelov****, ITMO University (St. Petersburg, Russia)*

В настоящей работе предлагается использовать единое информационное пространство - АС с геопространственным модулем для взаимодействия изыскательских компаний с фондами, сокращая временные и материальные затраты. Новая модель взаимодействия вкупе с открытым программным обеспечением и развитой системой проектирования, позволила создать продукт, отвечающий требованиям 21 века, в котором доступ осуществляется как через обычные стационарные ПК, так и мобильные устройства. Данная методика так же направлена на повышение качества и количества материалов для устойчивого хозяйственного ведения в строительной, научной и др. областях.

Кючевые слова: автоматизированная система, информационное пространство, разработка, фондовые материалы, ГИС технологии.

In this paper, it is proposed to use a single information space-AS with a geospatial module for interaction between survey companies and funds, reducing time and material costs. A new model of interaction, coupled with open software and a developed design system, made it possible to create a product that meets the requirements of the 21st century, in which access is made both through conventional stationary PCs and mobile devices. This methodology is also aimed at improving the quality and quantity of materials for sustainable economic management in the construction, scientific and other fields.

Key words: automated system, information space, development, stock materials, GIS technology.

E-mail: pogvic@mail.ru, roy2048@yandex.ru

Инженерные изыскания составляют основу современных методов получения данных об объектах земной поверхности, недрах и водных пространствах. Изыскания делятся на [9]:

- Инженерно-геодезические;
- Инженерно-геологические;
- Инженерно-гидрометеорологические;
- Инженерно-экологические.

В свою очередь они направлены на развитие строительства, усовершенствование производственных мощностей, обеспечение минерально-сырьевого потенциала страны и обычно состоят из следующих этапов:

1. Анализ материалов ранее выполненных работ в исследуемом районе, при их наличии;
2. Планирование объема необходимых работ и затрат на их исполнение;
3. Проведение самих изысканий;
4. Камеральная обработка и подготовка отчетных материалов. Сдача материалов в экспертизу или фонды.

Изыскания начинаются с анализа доступных материалов, которые передает заказчик. В случае их отсутствия – запрашиваются в фондах. Данные материалы важны не только для планирования работ, корректирования затрат на выполнение задания, но и для последующего сравнения их с актуальными данными, для, например, определении текущих изменений на объекте исследования.

Количество запрашиваемых материалов, к которым относятся отчеты, карты (планы) и геодезическая опора, может доходить до нескольких десятков экземпляров.

Особую важность имеет геодезическое обеспечение изыскательских работ для строительства, о чем особо указывается в руководящих документах [9]. Однако существующая практика получения фондовых материалов занимает значительное время. К тому же стоит указать на проблематику актуальности получаемых данных. Так, полученная из фонда информация может не соответствовать текущему состоянию объектов из-за утраты геодезических пунктов на местности в результате хозяйственной деятельности человека, нового строительства или же техногенных; природных аварий или природных катаклизмов. От полноты и качества предоставленных данных во многом зависит достоверность и полнота новых результатов. При недостаточной изученности района работ в части его геодезического обеспечения можно ожидать получение таких результатов, как:

- Неточное или неправильное положение объектов, либо сопутствующей инфраструктуры на поверхности земли, что в дальнейшем скажется на всем проекте;
- Невыполнение требований контролирующих организаций, в том числе невозможность прохождения итоговой экспертизы.

В настоящее время процесс запроса и получения фондовых материалов состоит из следующих, связанных между собой этапов:

1. Заявитель заполняет заявление и прикладывает комплект документов. Причем, прежде чем получить необходимые данные производится запрос об их наличии, и только после этого формируется окончательное заявле-

ние. Этот процесс изображен на схеме (рисунок 1) в графической нотации IDEF0 в виде диаграммы «AS-IS» (Как есть) [3].

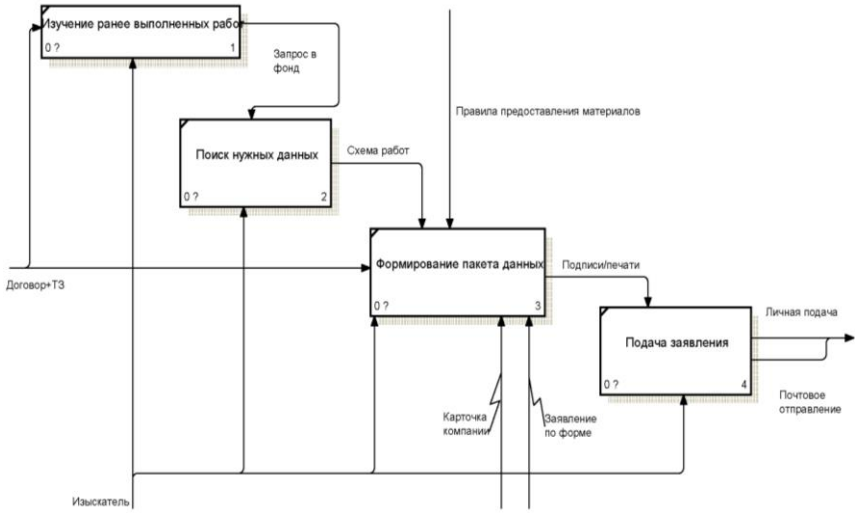


Рисунок 1 – Процесс составления запроса заявителем на получение фондовых материалов

2. Процесс выдачи выписки по заявлению в фонде заключается в регистрации этого заявления, перенаправлении задания в отдел работы с фондовыми данными, где назначается определенный исполнитель. Тот в свою очередь производит выписку из каталога и при необходимости корректирует объем запрашиваемых материалов. Данный процесс представлен на рис. 2, и является графической нотацией IDEF0, тип диаграммы «AS-IS» (Как есть).

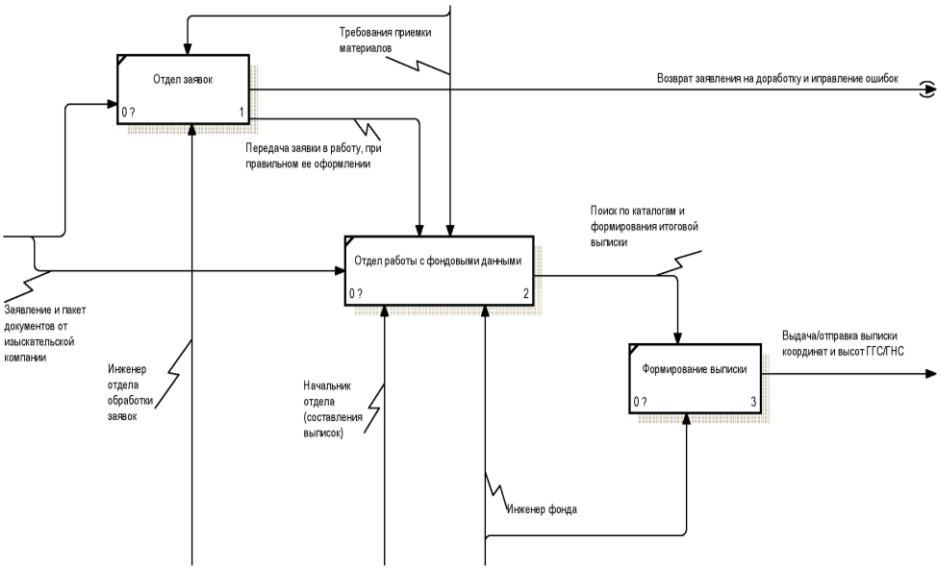


Рисунок 2 – Рабочий процесс в фонде при приемке итоговых данных

В данных процессах существует множество проблемных мест:

- временные затраты;
- некорректная работа связующих организаций;
- вопросы обеспечения безопасности полученных данных;
- процесс возврата в фонды итоговых материалов занимает значительное время и по завершению работ они не всегда отвечают требованиям, которые предъявляют контролирующие органы, что влияет на качество и полноту данных при производстве будущих работ.

В связи с этим напрашивается вывод о том, что необходимо создать современный инструмент, который связывает изыскательские компании с государственными фондами. Таким инструментом может выступить специализированная платформа, веб-приложение, сочетающее в себе автоматизированную систему [1,2,4] и модуль обработки географических данных. Веб-приложение выступает универсальным средством доступа к проектам, в которые добавляются данные, полученные после проведения изысканий, а также осуществление запросов и работы с ранее выполненными изысканиями для будущих работ. Такого рода система позволяет обеспечивать целостность и полноту данных, их актуальность, универсальный доступ.

Для создания подобной автоматизированной системы необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать структуру взаимодействия государственных учреждений и изыскательских компаний в едином информационном пространстве.
2. Сформировать единую географическую базу данных на основе открытых Open Source решений, обеспечив безопасность передачи данных и необходимый инструментарий.
3. Сформировать пользовательский интерфейс с возможностью визуализации материалов, как в 2D, так и в 3D видах; обеспечить максимальный уровень доступности к системе и простоту ее эксплуатации [5].

Ниже описывается структурная схема и диаграмма вариантов использования по первым решаемым задачам и приводится пример реализации модуля выбора геодезических пунктов в районе работ с помощью Web-браузера Mozilla Firefox.

1. Структурная схема и диаграмма вариантов использования во взаимодействия изыскательских компаний и госучреждений

Решением поставленной задачи является структурная схема, выполненная в графической нотации IDEF0 [3], типа «TO-BE» (рисунок 3), в которой представлен новый способ взаимодействия между предприятиями. Он основан на единой области – личном кабинете, в который изыскатель в случае получения выписки и по итогам работ загружает необходимые документы. В свою очередь инженер фонда проверяет первичную документацию и результаты работ, вынося итоговое заключение о качестве выполненных работ. Только после этого материалы изысканий попадают в архив и в будущем доступны для новых работ, либо находятся в базе данных, в актуализированном состоянии.

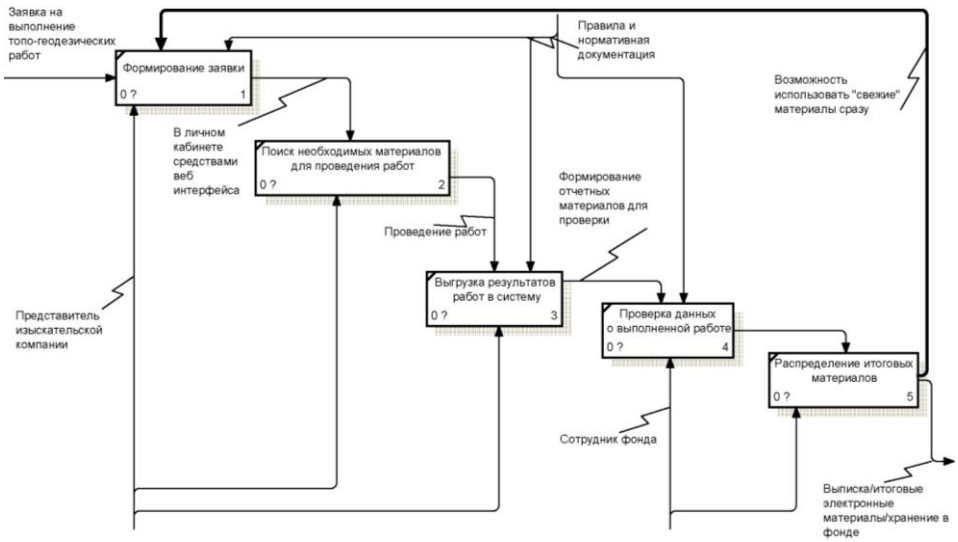


Рисунок 3 – Структурная схема новационного подхода при взаимодействии государственных фондов с изыскательскими компаниями средствами веб приложения

Еще более точно данную модель описывает диаграмма вариантов использования. На ней выделены функциональные блоки, роли пользователей, которые взаимодействуют друг с другом в едином информационном пространстве средствами визуального интерфейса и выполнениями запросов. Таким образом структурная схема показывает принцип взаимодействия, тогда как диаграмма вариантов использования (рисунок 4) описывает полную автоматизированную систему [4,8].

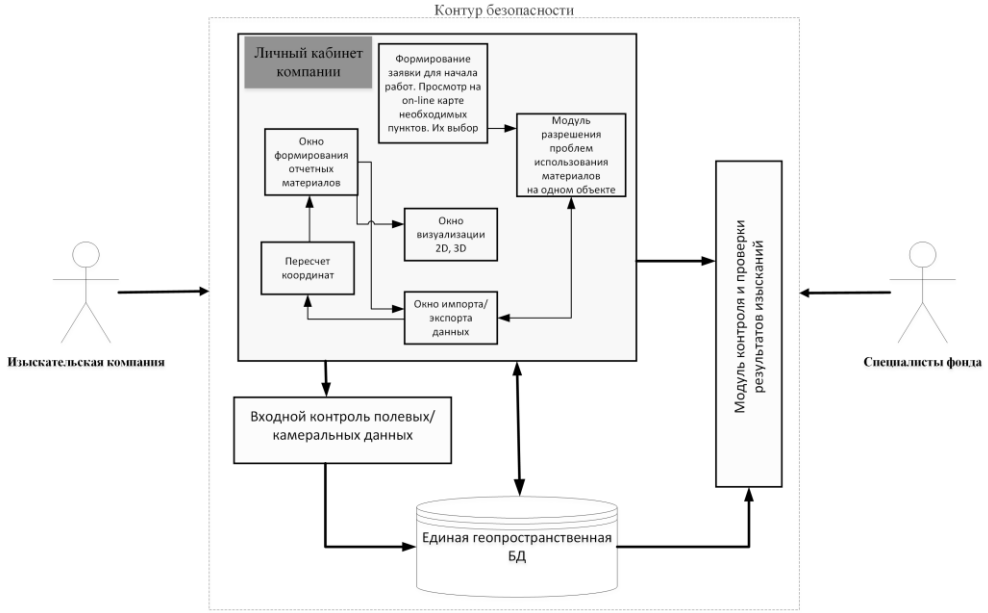


Рисунок 4 – Диаграмма вариантов использования системы управления работы с геодезической опорой

Новый подход позволяет сформировать рабочие документы в виртуальной среде, что сокращает время общего двустороннего документооборота. Это возможно на основе блоков, которые составляют костяк АС. Каждый блок – это отдельная операция, итоги выполнения которой доступны в других связанных блоках. Поэтому подготовка начальной документации и финальной проходит быстро, и вне зависимости от конкретного исполнителя. Выделяется общий доступ как для группы пользователей, так и для отдельных представителей одной организации. Это значит, что и из «поля», и из офиса есть возможность формирования документации, а это уменьшение общего количества времени на сами изыскательские работы и сдачу материалов, что экономит время и соответственно деньги организации. Плюсом такой модели служит также универсальность – то есть в работе может быть не только геодезическая опора, но и топографический план, батиметрическая съемка, ведомости и отчеты.

2. Используемое ПО при подготовке веб-проекта

Для создания данного решения используется студенческая версия PyCharm. Эта IDE, работающая с языком программирования Python подходит для формирования веб приложения стандарта MVC (Model-View-Control). В свою очередь, Python [6], хорошо интегрируются с языками программирования «специально заточенными» под интернет-технологии (JS, HTML5, CSS, PHP) [7]. Данный подход в формировании приложения хорош тем, что визуальную составляющую можно отделить от основного «процессинга», тем самым оптимизировать работу самого приложения, и повторно использовать данные, при этом не ухудшая производительность системы в целом. Программными средствами, скриптами, к приложению подключается геопространсвтенная база данных. Вся атрибутивная информация и данные представлены таблицами в БД, формирующие послойную информацию в самом приложении. БД построена на основе СУБД PostgreSQL/PostGIS. В свою очередь эта БД распространяется бесплатно, что является значимым моментом в построении АС с точки зрения материальных затрат.

Важнейшим критерием создания такой АС является одно из главных преимуществ, перед существующими принципами работы, это вседоступность такой системы. Работая на стороне удаленного сервера, и имея универсальный интерфейс пользователя: доступ к данным, отчетам, и другим инструментам осуществляется с различных устройств и из любого местоположения [2].

3. Пример реализации изложенной методики

На рисунке 5, показан модуль выбора необходимой геодезической основы. Интерфейс формируется на основе ранее заданных инструкций в HTML файле. Общее окно разделено на два: работа со слоями; отображение результатов поиска, зуммирования, добавления новых объектов, вывод формы с атрибутивной информацией. Вывод пользовательского интерфейса в данном случае производится через браузер Mozilla Firefox, но может быть выведен и через любой другой.

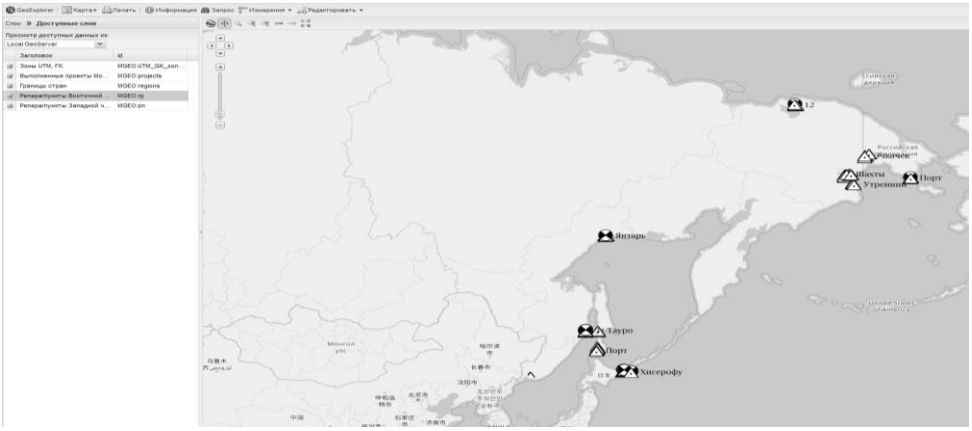


Рисунок 5 – Изображение работающего модуля отображения карты-подложки и геодезических пунктов в браузере Mozilla Firefox

Таким образом:

1) Сформирована новационная модель взаимодействия государственных фондов с изыскательскими компаниями, которая в свою очередь лежит в основе автоматизированной системы с геообработкой, позволяющая оптимизировать время получения и сдачи материалов, сократить затраты на получение материалов из не одного фонда, увеличить качество и количество материалов изысканий для лучшей хозяйственной деятельности.

2) Данный подход универсален, как и модель взаимодействия единого информационного пространства, веб-приложения, модули этой системы могут быть адаптированы для работы и с другими данными - батиметрической, топографической съемками, отчетами и т.д.

3) Использование базы данных позволяет сохранно владеть и использовать данные, при том, что в стандартной комплектации есть все средства для обеспечения безопасности и сохранности данных.

Список литературы

1. *Веб-ГИС. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://gis-lab.info/qa/webgis.html*
2. *ГОСТ 34.003-90 «Информационная технология (ИТ). Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения».*
3. *Дубейковский В.И., Эффективное моделирование с CA ERwin Process Modeler (BPwin; AllFusion Process Modeler), – М.: Диалог-МИФИ, 2009. – 384 с.*
4. *Конон Н.И., Методы построения информационного обеспечения геопространственных сетей в АСУ // ИНФОРМАЦИЯ И КОСМОС. 2004. №1. С. 47-49.*
5. *Место ГИС среди других автоматизированных систем. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://gistechnik.ru/publik/gis-i-asu.html*
6. *Мэтиз Эрик, Изучаем Python. Программирование игр, визуализация данных, веб-приложения. – СПб.: Питер, 2017. – 496 с.*
7. *Назаренко М.В., Хоменко С.А. Автоматизированная система управления горными работами современного предприятия на базе геоинформационной системы K-MINE // МАРКШЕЙДЕРСКИЙ ВЕСТНИК. 2009. №5. С. 30-37.*

8. *Роберт Дж. Мюллер, Проектирование баз данных и UML, – М.: Лори, 2013, – 432 с.*
9. *Свод правил "СП 47.13330.2012 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96" от 10 декабря 2012 № 47.13330.2012.*
10. *Stefano Iacovella, Brian Youngblood. Geoserver Beginner's Guide. – UK: Packt Publishing, 2013. – 326s.*

УДК 004.942
ББК 30

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМИТАТОРА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ПИЛОТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

© ***И.А. Прошин,*** *Пензенский государственный технологический университет* (*г. Пенза*, *Россия*)
© ***В.Н. Прошкин,*** *Пензенский государственный технологический университет* (*г. Пенза*, *Россия*)
© ***Э.А. Магомедова,*** *Пензенский государственный технологический университет* (*г. Пенза*, *Россия*)

SIMULATION OF THE IMITATOR OF THE SPATIAL MOVEMENT OF THE PILOT OF THE FLYING APPARATUS ON THE WATER SURFACE

© ***I.A Proshin,*** *Penza State Technological University* (*Penza*, *Russia*)
© ***V.N Proshkin,*** *Penza State Technological University* (*Penza*, *Russia*)
© ***E.A. Magomedova,*** *Penza State Technological University* (*Penza*, *Russia*)

В работе рассмотрена структура комплекса программ математического моделирования системы имитации колебаний летательного аппарата с посадкой на поверхность воды с учетом, направления движения волн и частоты их воздействия на имитируемый объект.

Ключевые слова: моделирование, комплекс программ, водная поверхность, летательный аппарат.

In this work, the technique and structure of a complex of programs for the mathematical modeling of the simulation system for the oscillation of an aircraft with a landing on the water surface are considered, taking into account the direction of motion of the waves and the frequency of their influence on the simulated object.

Key words: modeling, program complex, water surface, aircraft.

Моделирование имитатора пространственного движения пилота (ИПДП) летательного аппарата (ЛА) связано с решением целого ряда задач по исследованию особенностей движения летательного аппарата на поверхности воды, восприятию ИПДП пилотом, моделирования управляющих воздействий и линейных приводов системы подвижности кабины тренажера с компенсацией и без компенсации статической нагрузки, приходящаяся на шток ЛП.

Моделирование восприятия ИПДП необходимы для синтеза законов управления системой подвижностью авиационного тренажера. Вместе с результатами моделирования механизма движения летательного аппарата на

водной поверхности они являются основой для разработки и выбора системы подвижности.

Результаты моделирования динамических режимов линейного привода основа для формирования требований и совершенствования этих приводов и выбора структуры систем управления (СУ) с учетом сравнительной оценки приводов с компенсацией и без компенсации статической нагрузки [1 – 10].

Предлагаемая методика исследований с применением разработанных математических моделей (ММ) компонентов ИПДП включает в себя следующие этапы (рисунок 1):

1. Исследование возможных движений ЛА на поверхности воды.
2. Моделирование восприятия пространственного движения пилота.
3. Моделирование вариантов структуры СУ линейными приводами.
4. Исследование способов формирования задающих воздействий.
5. Исследование и оценка динамических режимов линейного привода.
6. Сопоставительный анализ и выбор элементов и параметров имитатора пространственного движения пилота летательного аппарата на поверхности воды.

На первом этапе решается задача определения параметров необходимых воздействий. Определяют механические параметры движения летательного аппарата на водной поверхности: амплитуды перемещений и их скорости движения, ускорения и градиенты перемещения ЛА на поверхности воды.

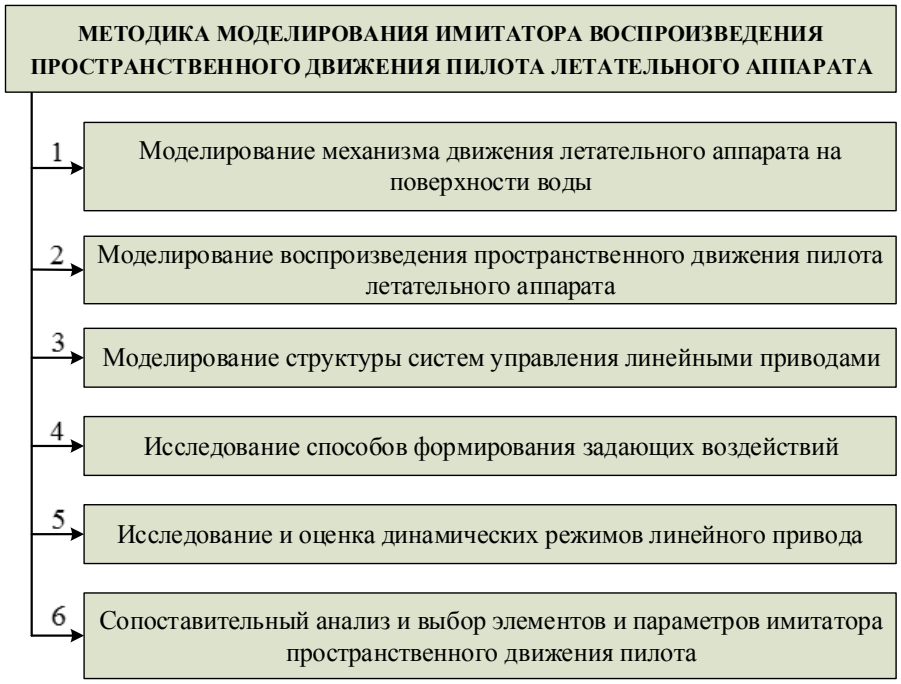


Рисунок 1 – Методика моделирования имитатора пространственного движения пилота летательного аппарата на поверхности воды

На следующем этапе проводится моделирование особенностей восприятия обучающим пилотом акселерационной информации. Основными параметрами вестибулярного аппарата, с точки зрения психофизиологии, считают величину

латентного периода (время между началом действия раздражителя на пилота и возникновением ответной реакции) и времени адаптации (время от начала действия раздражителя до того момента, после которого больше не происходит никаких изменений в сенсорной системе человека).

Стандартным воздействием при оценке латентного времени по линейным степеням свободы (вертикальное перемещение) является ускорение с постоянным градиентом, а по угловым степеням свободы (движение по крену, движение по тангажу) – постоянное ускорение с нулевым градиентом. Для оценки периода адаптации по угловым перемещениям используют воздействие STOP-STIMULUS (вращательные движения сопровождаются возникновением углового ускорения, являющегося физиологическим раздражителем рецепторов полукружных протоков части внутреннего уха человека, т.е. вращение с постоянной скоростью, и затем мгновенная остановка). Знание функции латентного периода от величины внешнего воздействия позволяет ввести величину порога по ощущению ускорения, а не по внешнему возмущению.

Важный этап математического моделирования ИПДП – исследование, выбор и определение основных параметров движения системы подвижности кабины тренажера при применении различных структур СУ. Поэтому на последующем этапе проводится анализ известных структур построения СУ линейными приводами.

Последующий этап направлен на моделирование и оценку динамических характеристик линейного привода. Основа выполнения этого этапа – ММ привода, способы формирования задающих воздействий и законы управления и структуры СУ.

По итогам моделирования на всех его стадиях проводится сопоставительный анализ и выбор составных частей и параметров ИПДП летательного аппарата.

Структура комплекса программных средств определяется задачами исследования, разработанными ММ и разработанной методикой моделирования (рисунок 2, табл. 1). Разработанный комплекс программных средств позволяет проводить моделирование всех составных частей ИПДП летательного аппарата.

Комплекс программ является составной частью интегрированного комплекса моделирования ИПДП и его составных частей, как с использованием ММ, так и на основе физических установок. Моделирование гидравлического привода и электрического привода осуществляется с использованием численного метода Рунге-Кутта 4-го порядка.

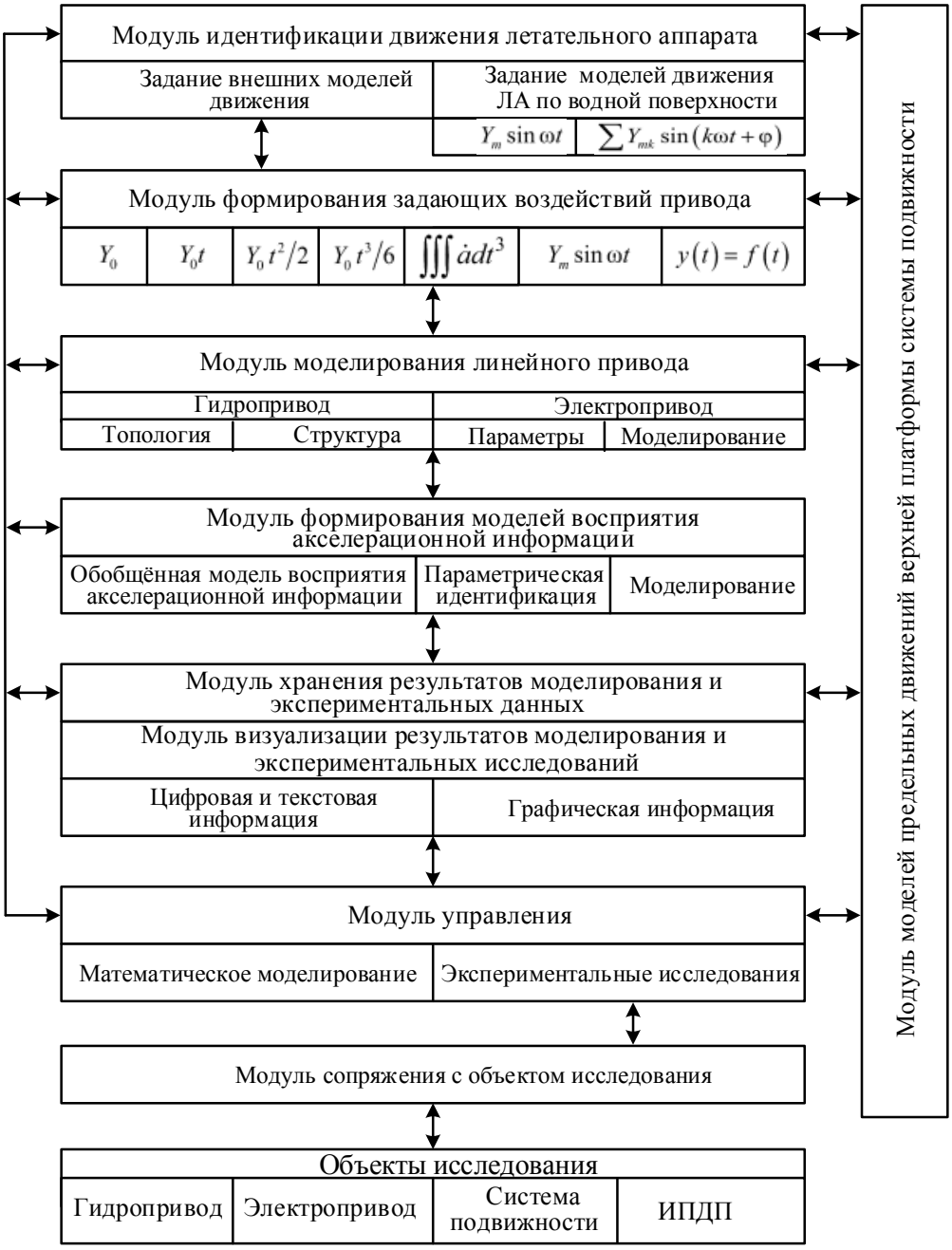


Рисунок 2 – Структура комплекса программ

Модуль идентификации движения ЛА включает в себя модели движения летательного аппарата по поверхности воды с возможностью внешнего задания ММ. Все режимы работы координируются с ММ предельных перемещений верхней платформы системы подвижности.

Таблица 1 – Структура моделей и программ

№	Математическая модель	ПО	Задачи
1	Задающих воздействий	ZY	Исследование способов формирования задающих воздействий, их предварительное моделирование и анализ.
2	Механизма движения летательного аппарата по водной поверхности	DOVP	Определение параметров необходимых воздействий. Определяют механические параметры движения ЛА на поверхности воды: амплитуды перемещений и их скорости движения, ускорения и градиенты перемещения летательного аппарата. Исследование механизма движения летательного аппарата на водной поверхности в зависимости от соотношения размеров ЛА и параметров гребня волны: скорости перемещения, высоты и частоты волны.
3	Восприятия пилотом ощущения пространственного движения	VAI	Моделирование особенностей восприятия пилотом пространственного движения. Установление величин латентного периода и времени адаптации. Определение законов управления и задающих воздействий.
4	Гидравлический привода	GP	Исследование динамики гидравлического привода, выбор оптимальной структуры СУ приводом. Моделирование режимов управления приводом при различных законах управления. Исследование и сравнительный анализ гидравлического привода с компенсацией и без компенсации статической нагрузки на подвижный шток гидроцилиндра.

В ходе выполнения работы решен комплекс проблем по разработке, исследованию и обоснованию ММ, методов и методик моделирования имитатора пространственного движения пилота летательного аппарата, обеспечивающих повышение качества моделирования акселерационных воздействий на обучаемого пилота ЛА, находящегося на поверхности воды.

В результате проведенных исследований разработана система ММ и комплекс программ моделирования компонент имитатора, являющийся базой для исследования и проектирования имитаторов пространственного движения пилота. Математические модели движения летательного аппарата на всех режимах полета, ощущения пилотом пространственного движения и ММ задающих воздействий, позволяющие проводить моделирование различных режимов управления гидравлическими приводами системы подвижности, и одновременно модели, которые могут быть рекомендованы для решения задач выбора законов управления не только для авиационных тренажеров, но и для тренажеров других транспортных средств.

Комплекс программ моделирования ощущения пространственного движения предназначен для использования на персональных компьютерах типа *IBM PC*, под управлением русскоязычной (локализованной), либо русифицированной версии операционных систем *Microsoft Windows XP/Server 2003/Vista*. Минимально возможная конфигурация компьютера предполагает: процессор *Intel Pentium* (или *Pentium* совместимый микропроцессор) с тактовой частотой 1,2 ГГц и выше; *RAM* 256 Мбайт и более; жесткий диск с объемом свободного пространства не менее 1,5 Гбайт; монитор с разрешением не менее 1024x768, цвет – 32 бит; клавиатура; манипулятор «мышь»; преобразователь интерфейса *RS-232* в интерфейс *RS-485* с гальванической развязкой *I-7520AR*. 2.3.3. Программа взаимодействует с СУБД *MySQL* версии не ниже 5.0.

Список литературы

1. *Прошин И.А., Тимаков В.М., Прошкин В.Н. Совершенствование динамических стендов авиационных тренажёров на базе гидроприводов / «Мехатроника, автоматизация, управление». – М: 2008. – № 12. – С. 18 – 22.*
2. *Прошин И.А., Тимаков В.М., Прошкин В.Н. Тренажер вертолета с имитацией посадки на взволнованную водную поверхность / «Мехатроника, автоматизация, управление». – М., 2009, №9. – С. 65 – 69.*
3. *Прошин И.А., Тимаков В.М., Прошкин В.Н. Тренажер плавающего объекта для обучения экипажей действиям в чрезвычайных ситуациях // Вестник «Морская техника и технология» – Астрахань: АГТУ, 2009. – №1. – С. 82 – 87.*
4. *Прошин И.А., Тимаков В.М., Сапунов Е.А., Савельев А.В. Моделирование движения динамического стенда авиационного тренажера с компенсацией нагрузки // Шестая Всероссийская научная конференция с международным участим «Математическое моделирование и краевые задачи», часть 2, Самара, 2009 – С. 152 – 154.*
5. *Прошин И.А., Тимаков В.М., Сапунов Е.А., Савельев А.В. Следящий гидропривод авиационного тренажера с компенсацией статической нагрузки // Международная научно-техническая мультиконференция «Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники», журнал «Мехатроника, автоматизация, управление» МАУ, с. Дивногорское, Геленджик, Россия, 2009 – С. 267 – 269.*
6. *Прошин И.А., Савельев А.В., Сапунов Е.А., Тимаков В.М. Построение имитационной модели законов управления динамическими системами // Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии в образовании, науке и производстве», «Сборник трудов конференции», часть 2, Серпухов, 2009 – С. 246 – 248.*
7. *Прошин И.А., Прошкин В.Н., Тимаков В.М. Математическое моделирование гидропривода динамического стенда авиационного тренажёра // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Курск, 2008. – № 11. – С. 113 – 119.*
8. *Прошин И.А., Тимаков В.М., Сапунов Е.А., Савельев А.В. Способы управления гидроприводами динамического стенда авиационного тренажера // Международная научно-техническая мультиконференция «Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники», журнал «Мехатроника, автоматизация, управление» МАУ, с. Дивногорское, Геленджик, Россия, 2009 – С. 291 – 293.*
9. *I.A. Proshin, V.M. Timakov, E.V. Hazarov, E.A. Sapunov Mathematical model of a hydraulic drive for a dynamic test stand, Riga, Latvia, 5-9 July 2010, p. 80 – 81.*
10. *I.A. Proshin, V.M. Timakov, S.A. Nikitashin, A.U. Sovelyev Mathematic modelling of control laws for a flight simulator dynamic test stand, Riga, Latvia, 5 – 9 July 2010, p. 82 – 83.*

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего *плюс*

Периодическое научное издание

Серия: Технические науки.

Информатика, вычислительная техника и управление

ISSN 2221-951X

9 772221 951003

Главный редактор А.Х. Шеуджен
Компьютерная верстка Н. Хлопцевой

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «КОПИ-РИЗО»
Пенза, ул. Московская, 74, к. 211. Тел. 56-25-09.
e-mail: tipograf_popovamg@inbox.ru

Подписано в печать 16.11.2017.
Выход в свет 28.11.2017.
Формат 70Х108 1/16
Бумага типогр. №1. Печать ризография. Шрифт Times New Roman.
Усл. печ. л. 12,3. Уч. изд. л. 13,2. Заказ № 1032. Тираж 100 экз.
Цена свободная

Адрес редколлегии, учредителя, редакции и издателя
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»:
440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11
Тел.: 8(8412) 20-86-39; E-mail: journal21@pgta.ru;
Сайт: http://www.penzgtu.ru/57/1091/