МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ИЗВЕСТИЯ

Юго-Западного государственного университета

Серия
УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА. МЕДИЦИНСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

№ 3 (16)
2015

Курск

2015. №3 (16)
Научный рецензируемый журнал

ИЗВЕСТИЯ

ЮГО-ЗАПАДНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение

Основан в 2011 г.

Выходит четыре раза в год

Учредитель: ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ №ФС77-44620 от 15.04.11).

Журнал «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» включен в перечень ведущих научных журналов ВАК Минобрнауки России

Редакционная коллегия

С.Г. Емельянов (главный редактор), д-р техн.наук, профессор, ректор ЮЗГУ;
В.С. Титов (заместитель главного редактора), д-р техн. наук, профессор, ЮЗГУ;
О.И. Атакищев, д-р техн.наук, профессор;
Н.М. Агарков, д-р мед. наук, профессор;
И.А. Авилова, д-р биол. наук, профессор;
М.В. Бобырь, д-р техн. наук, доцент;
А.А. Бурмака, д-р техн. наук, профессор;
В.Н. Гридин, д-р техн. наук, профессор;
С.В. Дегтярев, д-р техн. наук, профессор;
В.Э. Дрейзин, д-р техн. наук, профессор;

СОДЕРЖАНИЕ

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!.....6

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА.....8

Борзов Д.Б., Гуляев К.А., Чернецкая И.Е.
Реализация подхода многоитерационного сжатия видеосигнала с использованием RGB-модели и алгоритма Хаффмана.....8

Абрамова Т.В.
Концептуальное моделирование системы мониторинга, анализа и прогнозирования приоритетных направлений науки и технологий.....11

Ватутин Э.И., Журавлев А.Д., Заикин О.С., Титов В.С.
Особенности использования взвешивающих эвристик в задаче поиска диагональных латинских квадратов.....18

Лоторев П.В., Курочкин А.Г., Гривачев А.В., Емельянов С.Г.
Организация системы поддержки принятия решений для управления группой роботов.....30

Ефремова О.В., Ефремов И.С.
Система обеспечения пожарной безопасности объекта защиты с применением системы поддержки принятия управленческих решений.....36

Гришин Д.С., Титенко Е.А., Милостная Н.А., Шевченко М.А., Ханис В.А.
Алгоритм поиска подстроки на основе позиционного представления текста для архивно-текстовых данных.....43

Довбня В.Г., Севрюков А.Е.
Влияние нелинейных искажений на помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией.....49

Смирнов А.В.
Определение состояния двигателя автомобиля путем анализа его акустического шума с применением теории нечетких множеств.....56

Ж.Т. Жусубалиев, д-р техн. наук, профессор;
И.В. Зотов, д-р техн. наук, профессор;
Н.А. Кореневский, д-р техн.наук, профессор;
А.П. Локтионов, д-р техн. наук, доцент;
С.П. Серегин, д-р мед. наук, профессор;
А.С. Сизов, д-р техн. наук, профессор;
А.В. Филонович, д-р техн. наук, профессор;
С.А. Филист, д-р техн. наук, профессор;
Л.В. Шульга, д-р мед. наук, профессор.

Адрес редакции:
305040, г. Курск, ул.50 лет Октября, 94.
Телефоны: (4712) 22-25-26
Факс: (4712) 50-48-00.
E-mail: rio_kursk@mail.ru

Оригинал-макет подготовлен А.Е. Серебряковой

Подписано в печать 28.07.15. Формат 60×84/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 14,9.
Тираж 1000 экз. Заказ 54. Цена свободная.
Юго-Западный государственный университет
305040, г. Курск, ул.50 лет Октября, 94.

Плата с аспирантов за публикацию не взимается.

Подписной индекс журнала «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» 44288 в объединенном каталоге «Пресса России»

Нян Лин
Параллельный алгоритм и аппаратные средства межмодульного взаимоконтроля логических мультиконтроллеров.....62

Мартынов И.А.
Оценка аппаратной сложности устройства для быстрой аппаратно-ориентированной классификации бинарных отношений вершин граф-схем параллельных алгоритмов.....67

Усатюк В.С.
Определение кодового расстояния недвоичного LDPC-кода блочным методом Коркина-Золотарева.....76

МЕДИЦИНСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ.....86

Агарков Н.М., Иванов С.В., Голиков А.В., Климкин А.С.
Математическое обоснование эффективности использования индекса Чарльсона для лечения больных с механической желтухой желчнокаменного генеза.....86

Денисова В.Ю., Рыжова И.П., Гонтарев С.Н., Гонтарева И.С., Денисов М.М., Саливончик М.С.
Результаты использования метода конечных элементов в конструировании ортодонтических аппаратов из термопластических полимеров.....92

Земляков А.В., Тубол О.А., Байдаченко В.А., Муха Ю.П.
Пространственная модель элементов голеностопа в нелинейном случае.....98

Кореневский Н.А., Шуткин А.Н., Бойцова Е.А., Кореневская Е.Н.
Использование теории измерения латентных переменных для оценки уровня психоэмоционального напряжения.....103

Серегин С.П., Федянин В.В., Милостная Н.А., Петров С.В.
Математические модели прогнозирования возникновения (обострения) и определения формы острого пиелонефрита.....118

Замулин Д.О.
Прогнозирование хронического периодонтита у детей на основе регрессионного метода.....123

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ.....128

© Юго-Западный государственный университет, 2015

2015. №3(16)
Scientific reviewed journal

Published four a year

PROCEEDINGS

of the SOUTHWEST
STATE
UNIVERSITY
Management, computer facilities,
Computer science. Medical instrument making

CONTENS

RESPECTED COLLEQUES!.....6

INFORMATICS, COMPUTER SCIENCES.....8

Borzov D.B., Gulyaev K.A., Cherneckaja I.E.
Possible implementation approach, several iterations of the compression video signal using the rgb model and Huffman..... 8

Abramova T.V.
Conceptual modeling of systems for monitoring, analysis and prediction of the priority directions of science and technology.....11

Vatutin E.I., Zhuravlev A.D., Zaikin O.S., Titov V.S.
Features of using weighting heuristics in the problem of finging diagonal latin squares.....18

Lotorev P.V., Kuruchkin A.G., Grivachev A.V., Emelyanov S.G.
Design of decision support system for control of group of robots..... 30

Efremova O.V., Efremov I.S.
System of ensuring fire safety of object of protection with application of system of support of adoption of administrative decisions..... 36

Grishin D.S., Titenko E.A., Milostnaya N.A., Shevchenko M.A., Khanis V.A.
String matching algorithm based on positional representation of text for archival-text data.....43

Dovbnya V.G., Sevryukov A.E.
Influence of nonlinear distortions on the noise immunity of quadrature amplitude on-off modulation signal reception.....49

Smirnov A.
Determination of automobile engine condition based on the analysis of acoustic noise with using of fuzzy set theory.....56

Nyan Lin
Parallel algorithm and hardware of intermodular mutually control of logical multicontrollers..... 62

Martynov I.A.
Hardware complexity estimation of accelerator for fast determining of vertices binary relations of parallel algorithms graph-schemes..... 67

Usatjuk V.S.
Computing the minimum distance of nonbinary ldpc codes using block korkin-zolotarev method..... 76

MEDICAL INSTRUMENT MAKING.....86

Agarkov N.M., Ivanov S.V., Golikov A.V., Klimkin A.S.
A mathematical justification of the efficiency index of carlson for the treatment of patients with obstructive jaundice gallstone genesis..... 86

Denisova V.Yu., Ryzhova I.P., Gontarev S.N., Gontareva I.S., Denisov M.M., Salivonchik M.S.
The results of the use of the finite element method in the design of orthodontic appliances made of thermoplastic polymers..... 92

Zemlyakov A.V., Tubol O.A., Baydachenko V.A., Mucha Y.P.
The spatial model of ankle elements in the nonlinear case..... 98

Korenevsky N.A., Shutkin A.N., Boitcova E.A., Korenevsky E.N.
Using the theory of measurement of latent variables to assess the level of voltage psihoemotsianalnogo..... 103

Seregin S.P., Fedyanin V.V., Milostnaya N.A., Petrov S.V.
Mathematical models of risk prediction, certain forms of acute pyelonephritis..... 118

Zamulin D.O.
Prognostication of chronic periodontitis in children based on a regression method..... 123

INFORMATION FOR AUTHORS.....128

© Southwest State University, 2015

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

В материалах, включенных в новый выпуск научного журнала, освещены актуальные проблемы современного научного знания в области теории управления, вычислительной техники, информатики и медицинского приборостроения.

В разделе «Управление, вычислительная техника, информатика» спектр исследуемых проблем широк, тематика статей разнообразна и включает следующие вопросы: основные понятия и методы сжатия видеосигнала с использованием RGB-модели и алгоритма Хаффмана, что позволяет снизить объем передаваемых данных для передачи на большие расстояния; концептуальное моделирование системы мониторинга, анализа и прогнозирования приоритетных направлений науки и технологий; приведено описание стратегии использования стохастических методов на базе взвешивающих эвристик в задаче поиска диагональных латинских квадратов, приведены соответствующие взвешивающие эвристики, рассмотрены особенности метаоптимизации и даны результаты применения указанных эвристических подходов; разработана структура системы поддержки принятия решений для управления группой роботов в условиях активно воздействующей внешней среды; рассмотрена система обеспечения пожарной безопасности объекта защиты, ее основные элементы, а также современные модели пожароопасных ситуаций управления объектом защиты; представлен алгоритм поиска подстроки на основе позиционного текста для архивно-текстовых данных, также проведено сравнение разработанного алгоритма с самым быстрым из известных алгоритмов, которые используются при решении данной задачи; разработана аналитическая модель и получены графические зависимости, позволяющие оценить влияние нелинейных искажений на помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией; рассматривается возможность комплексной диагностики автомобильного двигателя по издаваемому им акустическому шуму, которая включает в себя определение его состояний, объединяемых в классы, на базе известных исходных данных, а также определение неизвестных состояний двигателя путем установки их степени принадлежности к определенному классу известных состояний с помощью теории нечетких множеств применительно к диагностируемым признакам; предложен параллельный алгоритм организации распределенного контроля модулей логических мультиконтроллеров и особенности его аппаратной реализации; рассмотрена задача аппаратно-ориентированной классификации бинарных от-

ношений вершин граф-схем параллельных алгоритмов; предложен метод Коркина-Золотарева для определения кодового расстояния недвоичного LDPC-кода.

В разделе «Медицинское приборостроение» представлены статьи по следующим вопросам: математическое обоснование эффективности использования индекса Чарльсона для лечения больных с механической желтухой желчнокаменного генеза; результаты использования метода конечных элементов в конструировании ортодонтических аппаратов из термопластических полимеров; рассматриваются вопросы использования теории измерения латентных переменных для оценки уровня психоэмоционального напряжения; предложены математические модели прогнозирования возникновения или обострения формы острого пиелонефрита; прогнозирование хронического периодонтита у детей в зависимости от различных антропогенных загрязнителей воздуха и питьевой воды для улучшения профилактики и снижения данной патологии.

Журнал отражает достаточно широкий спектр научных результатов. Авторы статей продолжают развивать существующие и выдвигать новые подходы к решению задач в своих предметных областях.

С.Г. Емельянов, д-р техн. наук,
профессор, ректор ЮЗГУ,
главный редактор журнала

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

УДК681.3

Д.Б. Борзов, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: borzovdb@kursknet.ru)

К.А. Гуляев, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: tumbler06@mail.ru)

И.Е. Чернецкая, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: white731@yandex.ru)

РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДХОДА МНОГОИТЕРАЦИОННОГО СЖАТИЯ ВИДЕОСИГНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ RGB-МОДЕЛИ И АЛГОРИТМА ХАФФМАНА

В работе представлены основные понятия и методы сжатия данных. Описан обобщенный алгоритм сжатия, в котором используется система RGB-модели. Обоснована необходимость разработки метода сжатия данных с использованием словаря и алгоритм, позволяющий сжимать видеопоток. Это позволяет снизить объем передаваемых данных для передачи на большие расстояния.

***Ключевые слова**: сжатие видео, метод Хаффмана, сжатие в реальном времени, RGB-модель.*

***

В настоящее время распространение сети «Интернет» происходит повсеместно. Если каких-то 20 лет назад сетью пользовались только на предприятиях и в крупных городах, то сейчас доступ к ней имеют жители даже самых маленьких населенных пунктов, которые зачастую удалены от «цивилизации». Одним из наиболее эффективных методов связи с такими регионами и инструментов управления ими являются видеоконференции. Но часто техническая оснащенность регионов сильно разнится ввиду различных причин.

Исходя из этого разработка программно-аппаратного обеспечения для сжатия потоковых данных в режиме реального времени является одним из перспективных направлений, обусловленных развитием сети «Интернет» и современных линий связи.

В опубликованных ранее статьях авторами были рассмотрены алгоритмы сжатия видеопотока с использованием RGB-модели в контексте «Теории цвета» [1] и подход поэтапного сжатия видеосигнала на базе алгоритма сжатия видеопотока с использованием RGB-модели [2]. Суть данного алгоритма заключалась в преобразовании RGB-кода так, чтобы сократить объем передаваемых данных с 24 бит исходного кода до 12 бит «усеченного» кода путем удаления четырех младших бит каждого из трех октетов исходного кода, отвечающих за оттеночные области цвета. Наглядно это изображено на рисунке 1.

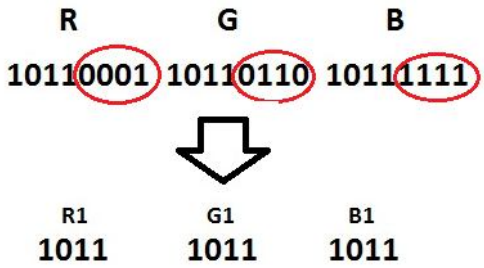


Рис. 1. Преобразования кода при использовании алгоритма сжатия видеопотока с использованием RGB-модели

На рисунке 1 обведены разряды исходного кода, подлежащие удалению. В результате таких преобразований сохраняется целостность изображения, уменьшается в 2 раза объем передаваемых данных, а потери происходят исключительно в градиентной области спектра, что практически не влияет на качество и целостность передаваемого изображения.

Чтобы увеличить коэффициент сжатия данных путем динамического подключения еще одного алгоритма сжатия – метода Хаффмана, необходимо дополнительно ввести 3 бита «схожести». Назовем их h_1, h_2 и h_3 соответственно, все они по умолчанию равны нулю [2].

В случае если первая тетрада сжатого кода равна второй, бит h_1 будет равен 1, если вторая тетрада равна третьей, тогда бит h_2 станет равным 1, а если первая и третья тетрады окажутся равными, то h_3 примет значение, равное 1, после чего из исходного кода удаляется одна из равных тетрад, а на выдачу передается только признак равенства и только одна из одинаковых тетрад. Таким образом, когда приемник на вход получает единицу в признаке равенства, он заполняет недостающую часть кода последовательностью из «равной» тетрады и восстанавливает код, полученный на первом этапе сжатия.

Подход, описанный выше, изображен на рисунке 2.

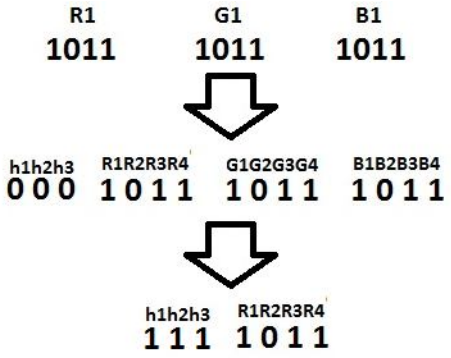


Рис. 2. Реализация второй ступени сжатия с использованием метода Хаффмана

Согласно рисунку 2 в случае, когда все 3 тетрады кода равны, нам необходимо передать только 3 бита равенства и 4 бита кода, что сокращает объем данных на 7 бит относительно исходного 12-битного «усеченного» кода.

В данной статье авторами предложен вариант аппаратной реализации вышеописанного алгоритма, изображенный на рисунке 3.

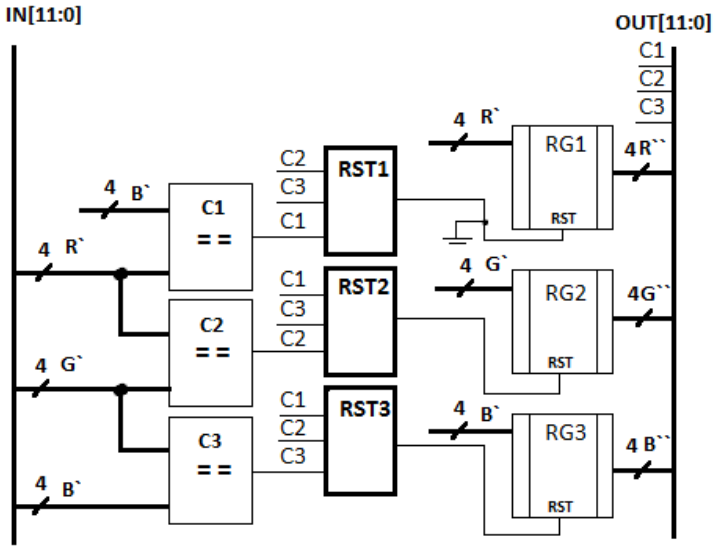


Рис. 3. Аппаратная реализация второй ступени сжатия

На рисунке 3 изображена структурная схема устройства, способного реализовать второй этап сжатия с применением алгоритма Хаффмана. К входной шине IN[11:0] устройства подключается выходная шина «Устройства для оперативного сжатия видеосигнала RGB-модели», далее данные по 4 разряда для составляющих R, G и B соответственно поступают на входы поразрядных компараторов C1, C2 и C3 для выявления совпадений. Сигналы с выходов компараторов подаются в блоки запрета передачи RST1, RST2 и RST3, выходные сигналы которых соединены со входами сброса выходных регистров RG1, RG2 и

RG3 соответственно, и блокируют передачу совпавших тетрад.

Вход сброса регистра RG1 «подтянут» к 0, т.к. первая тетрада передается в любом случае. Логика работы блоков RST2 и RST3 изображена на рисунках 4 и 5 соответственно.

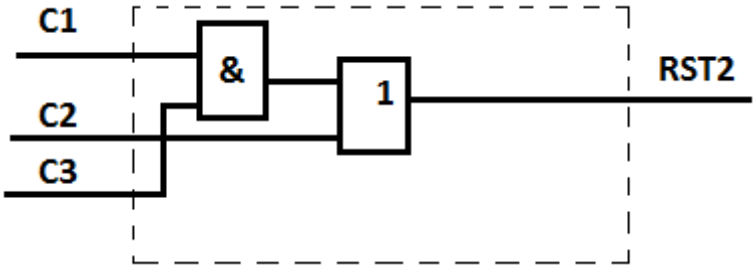


Рис. 4. Логика работы блока RST2

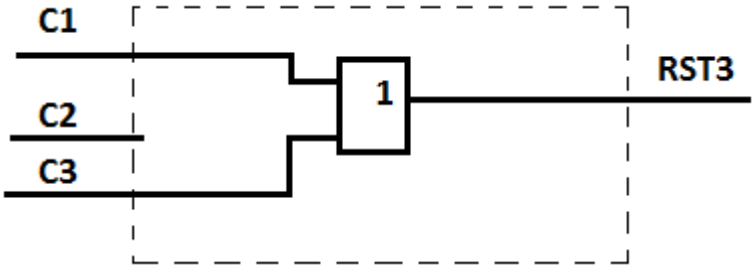


Рис. 5. Логика работы блока RST3

Таким образом, после выполнения преобразований на выходную шину OUT[11:0] поступают только «отсеянные данные» и 3 разряда признака.

Основываясь на анализе проблемной области, можно сделать вывод, что предложенная авторами аппаратная реализация подхода может являться решением рассмотренной задачи, так как таким образом удастся достичь большего коэффициента сжатия данных. А поскольку процесс вещания происходит в реальном времени, то необходимо применение альтернативных аппаратных средств, так как существующие программно-аппаратные реализации не подходят или не способны полностью обеспечить необходимый результат.

Список литературы

1. Борзов Д.Б., Гуляев К.А. Видеоконференцсвязь: общая организация, метод сжатия с использованием словаря // Инженер: студенческий научно-технический журнал. – 2013. – №14. – С. 83-86.

2. Борзов Д.Б., Гуляев К.А. Алгоритм сжатия видеопотока с использованием RGB-модели и его аппаратная реализация // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы: материалы Пятнадцатой Международной научно-практической конференции: в 3 кн. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – Кн. 1. – С. 58-63.

3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: [пер. с англ.]. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

4. Балашов К.Ю. Сжатие информации: анализ методов и подходов: учебное пособие для вузов.– СПб.: ПИТЕР, 2004. – 234 с.

5. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.– 384 с.

Получено 15.06.15

D.B. Borzov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: borzovdb@kursknet.ru)

K.A. Gulyaev, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk) (e-mail: tumbler06@mail.ru)

I.E. Cherneckaja, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: white731@yandex.ru)

POSSIBLE IMPLEMENTATION APPROACH, SEVERAL ITERATIONS OF THE COMPRESSION VIDEO SIGNAL USING THE RGB MODEL AND HUFFMAN

The paper presents the basic concepts and methods of data compression. Describes a generalized compression algorithm that uses a system of RGB - model. The necessity of developing a method of compressing data using a dictionary and an algorithm that allows to compress the video stream. This makes it possible to reduce the transmission of data for remote transmission of data (video, remote video conference, etc.).

***Key words**: video compression, Huffman method, real-time compression, RGB-model.*

УДК 51-7

Т.В. Абрамова, научный сотрудник, Национальный исследовательский Томский государственный университет (e-mail: egs@sibmail.com)

КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА, АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

На основе расширенной концептуальной модели Форсайта, представляющего собой систему методов экспертной оценки стратегических перспектив инновационного развития, выявления технологических прорывов, которые способны оказать максимальное воздействие на экономику и общество в средне- и долгосрочной перспективе, представлена автоматизированная схема мониторинга, анализа и прогнозирования.

***Ключевые слова**: инновации, технологические прорывы, анализ, перспективы, прогноз, Форсайт, методы, концептуальная модель.*

***

Одним из инструментов, позволяющим выявить приоритетные области науки, технологий и инноваций, а также разработать план конкретных действий по их развитию, является Форсайт, представляющий собой систему методов экспертной оценки стратегических перспектив инновационного развития, выявления технологических прорывов, которые способны оказать максимальное воздействие на экономику и общество в средне- и долгосрочной перспективе.

Понятие *«Форсайт» («Foresight»)* было введено в оборот Гербертом Уэллсом еще в 1932 г. В одном из публичных выступлений известный писатель-фантаст высказался о необходимости новой научной специальности – «профессор Форсайта», – задачей которой должно являться исследование будущих технологических открытий и поиск областей их применения.

Однако как система методов Форсайт сформировался значительно позже, в период 1940-1950 гг. В то время Форсайт уже рассматривался как систематический и системный процесс, позволяющий с помощью экспертных оценок оценить будущее развитие предметной области, но его методический аппарат был достаточно ограниченным. Ряд существенных нововведений, получивших впоследствии широкое распространение, принадлежал американской корпорации RAND.

Одним из первых базовых методов Форсайта стал *метод Дельфи*, представляющий собой многоуровневый экспертный опрос с обратной связью [1]. Прин-

цип этого метода заключается в следующем: на первом этапе большому числу экспертов (нередко это несколько тысяч человек) предлагается заполнить специальные анкеты, содержащие вопросы относительно степени перспективности тех или иных разработок, их уровня освоения в стране и за рубежом и т.п. После обработки результатов анкеты, включающие не только вопросы, но обобщенные ответы предыдущего этапа, вновь направляются тем же самым экспертам. Респондент имеет возможность либо подтвердить, либо изменить свои оценки, имея перед глазами мнение всего экспертного сообщества. На практике метод Дельфи обычно проводится в два раунда, хотя число раундов может быть большим.

Успешный опыт США по использованию технологического Форсайта в середине XX века был использован другими странами. На основе метода Дельфи в Японии в 1971 году был реализован проект «Future Technology in Japan toward the Year 2030». Исследование было проведено Национальным институтом научно-технологической политики Японии (National Institute of Science and Technology Policy, NISTEP), одним из ведущих мировых центров в области долгосрочного прогнозирования [2]. С тех пор в этой стране Форсайт на национальном уровне проводится регулярно, в настоящее время завершена работа над 9-м долгосрочным прогнозом.

С 1980-х годов пионерные работы по технологическому Форсайту проводились во Франции, Швеции, Канаде, Австралии. В этот период был отмечен резкий рост интереса к Форсайт-исследованиям. В это время в США стартовал Форсайт-проект Министерства обороны и Министерства торговли по выявлению «критических технологий», в Нидерландах реализованы Форсайт-проекты под эгидой Министерств экономики, образования и науки, широкий общественный резонанс вызвали национальные Форсайты в Германии и Великобритании.

С 1990-х годов применительно к Форсайту все реже используется приставка «технологический». Так, два последних цикла британских Форсайтов уже не назывались «технологическими», они отражали более широкое, комплексное видение будущего развития. В этот период Форсайт вышел за рамки исследования науки и технологий и стал широко использоваться для анализа перспективных рынков. В последнее время он применяется для прогнозирования социальных процессов, а также при формировании инфраструктуры национальных инновационных систем. Фактически речь идет о комплексном предвидении всех сторон развития общества. И это закономерно: современная инновационная модель предполагает наличие развитой системы подготовки специалистов, высокого образовательного и культурного уровня населения, научного потенциала, эффективной системы коммуникаций, поддержания высокого уровня социальной стабильности. Форсайт сегодня ориентирован на то, чтобы оценить перспективы социально-экономического развития в глобальном контексте, обеспечить устойчивое развитие при возрастающей взаимозависимости различных сфер жизнедеятельности общества.

В 2000 году число стран, активно использующих Форсайт на национальном уровне, превысило 30. В настоящее время эта методика взята на вооружение не только в Западной Европе, США и Японии, но и рядом развивающихся стран и стран переходной экономики – новых членов ЕС, в частности в Венгрии, Чехии, Польше. Всего в совокупности за последнюю четверть века отдельными развитыми государствами и крупными компаниями проведено более тысячи Форсайт-проектов.

Основные отличия Форсайта от прогнозирования представлены в таблице.

В целом система методов Форсайта постоянно развивается и совершенствуется – за последние десять лет накоплен большой опыт их практического приме-

нения. Набор подходов охватывает сегодня десятки методов – как качественных (интервью, обзоры литературы, морфологический анализ, «деревья соответствий», сценарии, ролевые игры и др.), так и количественных (анализ взаимного влияния (cross-impact analysis), экстраполяция, моделирование, анализ и прогноз индикаторов методов и др.). Ряд методов носит синтетический характер, в их числе – упомянутые выше Дельфи, дорожная карта, критические технологии, а также многокритериальный анализ, патентный анализ, игровое моделирование и др. Набор методов, применяемых в том или ином проекте, может выбираться с учетом множества факторов: временных и ресурсных ограничений, наличия достаточного количества высококвалифицированных экспертов, доступа к информационным источникам и др. Тем не менее ключевым условием успешности проекта является использование методов, обеспечивающих эффективную работу привлекаемых экспертов.

Сравнительный анализ Форсайта и прогнозирования

Принцип	**Форсайт**	**Прогнозирование**
Вовлечение	Участвуют представители всего общества	Проводится учеными
Коммуникация	Коммуникация участников важна для достижения консенсуса	Коммуникация участников прогноза не является принципиальным фактором
Горизонт исследования	Обычно 10-15 лет, иногда доходит до 80-90 лет	Горизонт сильно зависит от наличия динамических рядов данных. В среднем меньше, чем у Форсайта
Координация	Оценки развития науки и технологий даются в неотрывной связи с экономическими и социальными изменениями	Основный фокус делается на предметной области
Консенсус	Определяет, есть ли консенсус относительно исследуемых тем	Наличие консенсуса или его отсутствие – непринципиальный фактор
Экспертиза	Преобладают экспертные методы	Преобладают количественные методы
Альтернативность	Рассматриваются альтернативные варианты достижения желаемого образа будущего	Обычно рассматривает базовый вариант
Системность	Форсайт охватывает не только предметную область, но и внешнюю среду к ней	Прогноз делается для конкретной области
Открытость	Исходные данные, потребности, вопросы исследования все еще открыты и подлежат уточнению в процессе Форсайта. Результаты доводятся до сведения как можно большего числа людей	Исходные данные, темы и вопросы исследования должны быть определены заранее

Эффективность комбинированного применения различных качественных и количественных методов нашла свое подтверждение. В то же время стало очевидно, что большие проекты, посвященные выбору технологических приоритетов на национальном уровне, требуют новых подходов, обеспечивающих получение объективных оценок, основанных на количественном анализе эмпирических данных – статистических индикаторов, патентной статистики, библиометрической информации и др. В этой связи претерпела изменение и идея «треугольника Форсайта». В работах И. Майлса и Р. Поппера [3] было предложено добавить еще одну вершину – «доказательность» и тем самым превратить треугольник в ромб (рис.1).

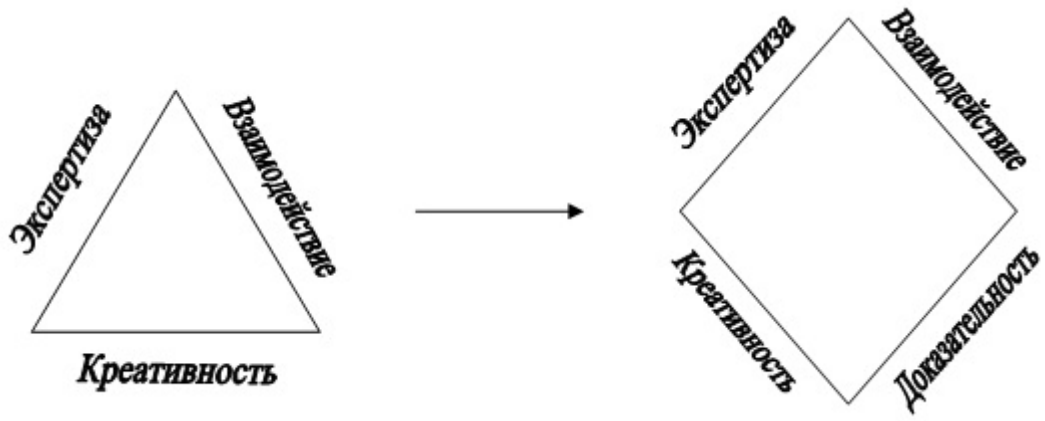


Рис. 1. Концептуальный переход от Форсайт-треугольника к Форсайт-ромбу

В настоящее время Форсайт включает в себя методы, относящиеся к разным областям науки: социологические, математические, статистические и т.п.

Все методы Форсайта могут быть сгруппированы по четырем ключевым категориям [4]:

– **экспертиза (expertise)**: для верификации результатов, полученных на основе анализа первоисточников, необходимо обсудить тенденции развития предметной области с ключевыми специалистами в этой сфере, представляющими науку, бизнес, государственные организации;

– **креативность (creativity)**: для того чтобы предвидеть неожиданные повороты развития будущего, необходимо внести элементы творчества в анализ. Типичным примером креативных методов являются wild cards («случайные факторы», «джокер») и weak signals («слабые сигналы»). Так, сущность метода wild cards заключается в том, что на основе различного рода информации (научных и публицистических статей, интервью с экспертами и др.) выявляются события, имеющие низкую вероятность наступления, но при этом способные оказать большое влияние на дальнейший ход развития. Одним из характерных примеров wild cards является авария на атомной электростанции «Фукусима», заставившая мировое сообщество по-новому взглянуть на перспективы развития атомной энергетики;

– **взаимодействие (interaction)**: в процесс Форсайта необходимо вовлекать как можно больше заинтересованных сторон, включая представителей науки, бизнеса, государства, обеспечивая их постоянный диалог относительно будущего развития. Если предмет исследования затрагивает широкие слои общества, большое внимание следует уделить информированию населения о ходе работ по Форсайту и его основных выводах. Достигается это за счет проведения различного рода семинаров, панелей граждан и т.п.;

– **доказательность (evidence)**: для достоверности результатов Форсайта необходимо базироваться на опублико-

ванных ранее работах и изучать лучшую мировую практику в предметной области. Кроме того, на основе патентного и библиометрического анализа можно сформировать пул наиболее квалифицированных экспертов по исследуемой тематике.

Важность Форсайта для России сегодня состоит в том, что он представляет собой пример коммуникационной платформы, которая позволяет широко обсуждать актуальные проблемы развития науки и технологий, разрабатывать инновационные стратегии с участием всех заинтересованных лиц, координировать деятельность по их реализации.

С помощью Форсайта становится возможным создание адекватной системы анализа, мониторинга и прогнозирования развития науки и технологий. Форсайт способствует концентрации инновационных ресурсов на решении наиболее важных научно-технических задач на средне- и долгосрочную перспективу и подготовке предложений по мерам государственной научно-технической и инновационной политики, позволяя обеспечивать органы управления инновационной и научно-технологической политикой Российской Федерации актуальной, полной, достоверной и регулярно обновляемой информацией о положении дел в секторе исследований и разработок. Наконец, за счет использования Форсайта становится возможным разработать инновационные стратегии для отраслей российской экономики, способствуя тем самым укреплению национальной конкурентоспособности.

Отдельным предметом исследований в работе является вопрос разработки индикаторов для оценки экспертами технологических альтернатив, а также критериев выбора. На данный момент можно сделать вывод о том, что содержание критериев выбора непосредственно зависит от сути принятых стратегических приоритетов государственного управления. На различных уровнях государственного управления можно выделить разное «первенство» стратегических национальных приоритетов, т.е. более главными могут быть задачи «поддержки фундаментальной науки» или «повышения качества жизни населения», «достижения высоких темпов экономического роста», «развития образования, культуры», «обеспечения обороны и безопасности страны». Ранжирование приоритетов, как представляется, следует делегировать законодательной власти.

В исследованиях целесообразно рассмотреть применимость известных критериев оценки проектов к отбору (в качестве приоритетных) тех технологических направлений, которые находятся на стадиях освоения и налаживания производства созданного прототипа. Наряду с этим необходимо изучить возможность поддержки в качестве критических не только разработок, практически готовых к выходу на рынок, но и тех исследований, которые находятся на доконкурентном этапе жизненного цикла, т.н. новые, зарождающиеся направления науки и технологий.

Для выбора приоритетных направлений и критических технологий необходимо рассмотреть «критические» проблемы с учетом достигнутого и достижимого уровня развития национальной науки и техники. В данном случае «критическая проблема» – это инновационная проблема социально-экономической сферы, которая отвечает хотя бы одному из следующих условий: проблема либо критична для многих производителей или социальных лиц; либо составляет необходимое звено производства продукта, признанного чрезвычайно важным для конкурентоспособности экономики; либо она составляет необходимое звено решения социальной задачи, признанной чрезвычайно важной. При этом критические проблемы выступают в качестве мотива для выбора технологий. В этом случае широкое участие в выборе приоритетов научно-технического развития представителей различных слоев общества (государственное управление, наука, производство, бизнес, социальные структуры)

представляется возможным. А применение дискуссий, опросов в рамках составления т.н. «технологических дорожных карт» или в рамках проектов предвидения будущего (Форсайт) представляется осмысленным.

В отношении вопроса о возможности включения социальных технологий в перечни приоритетных направлений и перечней критических технологий можно сделать вывод об отсутствии принципиальных возражений для развития перечней в направлениях, приближенных к задачам повышения качества жизни, поддержки образования и культуры. Для отбора социальных технологий необходимы критерии, характеризующие возможность достижения социальных приоритетов, социально-экономических целей.

Необходимо также отметить, что в условиях платности научно-технической информации, в том числе в области патентной статистики, и все большей субъективизации экспертных оценок возрастает роль информационного обеспечения процедур выбора приоритетов научно-технического развития. Однако данные федерального государственного статистического наблюдения и выборочных исследований представляются недостаточными. Исходя из целей достижения полноты, точности, актуальности информации, при осуществлении проекта по разработке перечней приоритетных направлений и критических технологий (на любом уровне – федеральном, региональном, отраслевом) целесообразно разработать методологию и проводить на регулярной основе комплексные патентные исследования по выявлению патентной ситуации в сфере реализации критических технологий в России и за рубежом, в том числе в целях выявления «патентного всплеска», составления прогноза развития новых технологических направлений и выявления конкурентной ситуации.

В качестве еще одного направления развития методологии выбора приоритетов научно-технического развития и выбора критических технологий представляется актуальным исследование вопроса разработки специального классификатора технологий и проведение анализа возможностей использования действующих отечественных, международных, зарубежных тематических рубрикаторов и классификаторов научно-технической информации.

Таким образом, система научных приоритетов и критических технологий не является линейной, а представляет собой иерархически построенную многоуровневую систему, динамичную и эволюционно изменяющуюся в соответствии с принципами адаптации к существующей социально-экономической ситуации глобального и национального масштаба, с учетом тенденций мирового научно-технологического развития и опережающими прогностическими сценариями совершенствования и развития научно-технологического потенциала России.

Все в той или иной степени успешные проекты последних лет основывались на комплексных подходах. Более того, отчетливо прослеживается тенденция постоянного усложнения системы используемых методов, в том числе с применением математических методов, позволяющих усилить Форсайт-исследование научно обоснованными оценками, позволяющими сделать более точный сценарный прогноз, основанный на количественной оценке целевых показателей, а также выявить правила классификации «Если …, то» для выработки необходимых рекомендаций по корректировке перечня критических технологий. Можно сказать, что экспертные мнения и заключения проходят своеобразную проверку на доказательность интеллектуальными методами анализа.

По результатам проведенного исследования была предложена концептуальная модель проведения экспертных опросов по гибкой системе индикаторов, описывающих данную технологию.

На начальном этапе она включает комплекс выделенных экспертами коли-

чественных и качественных индикаторов. На следующих этапах она может быть модифицирована другими признаками в зависимости от социально-экономических и политических целевых факторов.

Разработанная автоматизированная система включает в себя 2 уровня, связанных между собой анализом и прогнозом (рис. 2). Работа автоматизированной системы, функционирующей в итерационном режиме, проста и не требует пояснений.

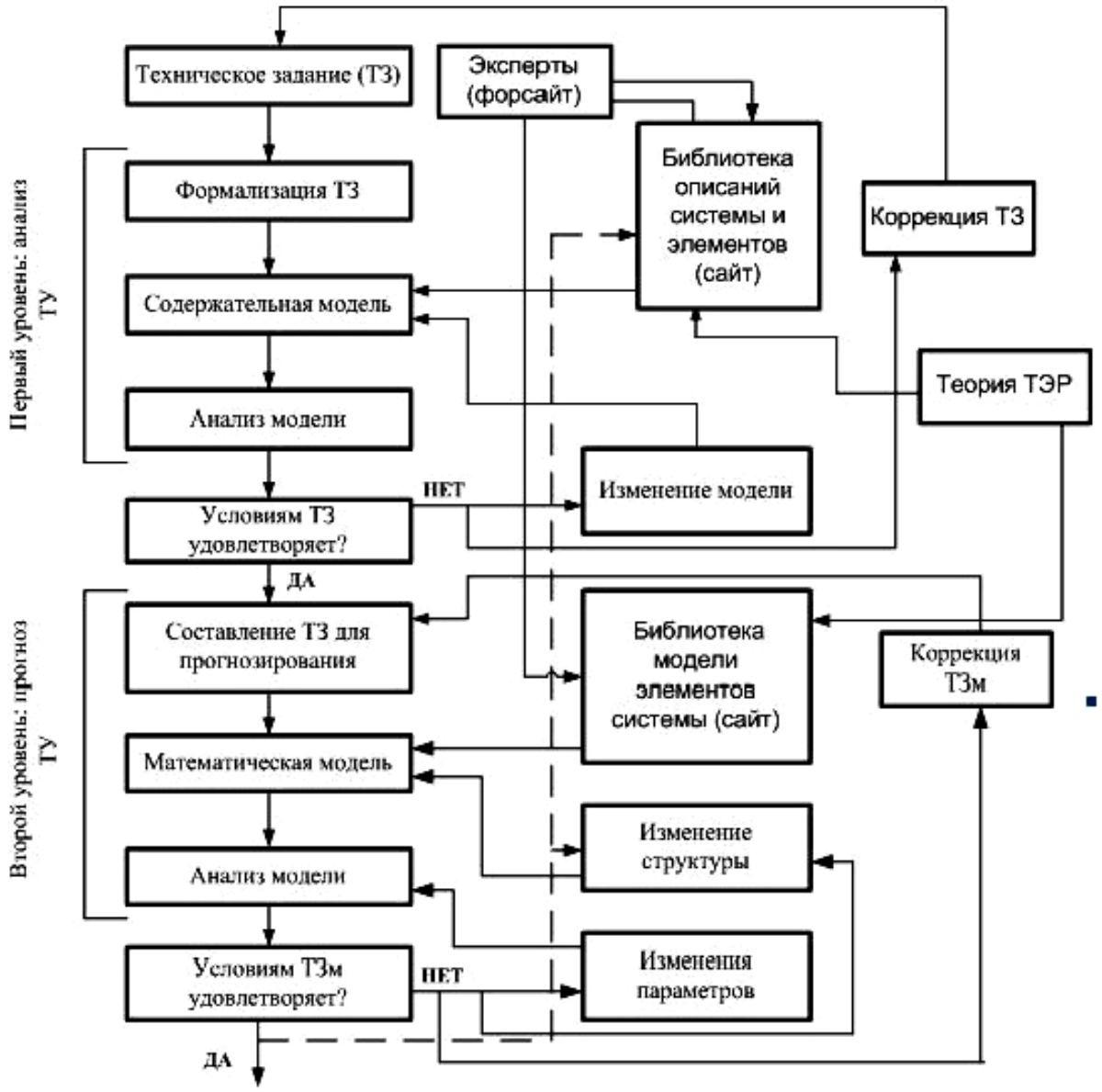


Рис. 2. Автоматизированная система анализа и прогноза
(ТЭР – технико-экономическое развитие; ТЗп – ТЗ для прогноза)

В заключение отметим, что данный методологический подход, основанный на доказательности математическими методами анализа, полностью вписывается и развивает технологию Форсайт-исследований.

Работа выполнена по программе повышения конкурентоспособности национального исследовательского Томского государственного университета.

Список литературы

1. Dalkey N.C., Helmer-Hirschberg O. An experimental application of the Delphi method to the use of experts. RAND Report RM-727-PR, 1962.

2. NISTEP. The 8th science and technology Foresight survey – Delphi analysis. National Institute of Science and Technology Policy. – Tokyo, 2005.

3. Popper R. Methodology: Common Foresight Practices & Tools, in Georghiou, L. et al., International Handbook on Foresight and Science Policy: Theory and Practice. – Edward Elgar, 2007.

4. Горбачев С.В., Сырямкин В.И., Сырямкин М.В. Интеллектуальный Форсайт-прогноз научно-технологического развития государствав / LAMBERT Academic Publishing. – Saarbrucken, Германия, 2012. – 132 с.

Получено 10.07.15

T.V. Abramova, Research Assistant, Tomsk National Research State University
(e-mail: egs@sibmail.com)

CONCEPTUAL MODELING OF SYSTEMS FOR MONITORING, ANALYSIS AND PREDICTION OF THE PRIORITY DIRECTIONS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

On the basis of the extended conceptual model of foresight, which is a system of methods of expert evaluation of the strategic prospects of innovative development, identification of technological breakthroughs that can have a maximum impact on the economy and society in the medium and long term, the automated scheme monitoring, analysis and forecasting.

***Key words**: innovation, technological breakthroughs, analysis, Outlook, forecast, foresight, methods, conceptual model.*

УДК 681.3

Э.И. Ватутин, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: evatutin@rambler.ru)

А.Д. Журавлев, программист, интернет-портал BOINC.ru (Самара)
(e-mail: alexone07@mail.ru)

О.С. Заикин, канд. техн. наук, Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова Сибирского отделения РАН (Иркутск) (e-mail: zaikin.icc@gmail.com)

В.С. Титов, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: titov-kstu@rambler.ru)

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЗВЕШИВАЮЩИХ ЭВРИСТИК В ЗАДАЧЕ ПОИСКА ДИАГОНАЛЬНЫХ ЛАТИНСКИХ КВАДРАТОВ

Приведено описание стратегии использования стохастических методов на базе взвешивающих эвристик в задаче поиска диагональных латинских квадратов. Показано, что исходная задача, относящаяся к классу задач на существование решения, может быть эффективно сведена к задаче на оптимальность, являющейся задачей дискретной комбинаторной оптимизации и, следовательно, допускающей применение при ее решении эвристических подходов, соответствующих методам случайного и взвешенного случайного перебора, а также алгоритма муравьиной колонии. В статье приведены соответствующие взвешивающие эвристики, рассмотрены особенности метаоптимизации и даны результаты применения указанных эвристических подходов при поиске диагональных латинских квадратов различного порядка. С использованием метода полного перебора с ограничением на число анализируемых ветвей показано, что в пространстве поиска решения расположены неравномерно, что позволяет использовать эвристические методы с целью выполнения разведки пространства с последующим уточнением его перспективных областей.

***Ключевые слова**: латинские квадраты, дискретная комбинаторная оптимизация, эвристические методы, метод взвешенного случайного перебора, алгоритм муравьиной колонии, метаоптимизация.*

***

Одной из интересных комбинаторных задач является задача построения диагональных латинских квадратов заданного порядка *N*. В общем случае неизвестен полиномиальный алгоритм для перечисления всех возможных диагональных латинских квадратов для произвольного *N*. В частности, если точное количество латинских квадратов порядка 10 известно [1], то для диагональных латинских квадратов порядка 10 этот факт еще не установлен. Из этого следует, что задача построения диагональных латинских квадратов порядка 10 в достаточной степени интересна с позиции возможности применения для ее решения различных комбинаторных подходов, основанных на использовании эвристик.

В данной статье приведены результаты использования эвристик, соответствующих случайному перебору [2–3], взвешенному случайному перебору [4] и алгоритму муравьиной колонии [5–7] в указанной задаче. Данная группа эвристик может быть эффективно применена при последовательном итеративном заполнении элементов латинского квадрата без каких-либо модификаций уже полученных решений (например, с использованием метода имитации отжига и др. [8–9]), комбинаторных возвратов [10] и т.п. приемов.

Латинский квадрат (ЛК) [11] порядка *N* является частным случаем магического квадрата и представляет собой матрицу $A = \|a_{ij}\|$, $i, j = \overline{1, N}$, элементами a_{ij} которой являются элементы некоторого множества S мощности $N = |S|$ (для определенности далее будем полагать, что $S = \{0, 1, 2, ..., N-1\}$).

По определению в каждой строке и в каждом столбце латинского квадрата каждый из элементов множества *S* встречается в точности один раз:

$$\begin{aligned} &\forall i, j, k = \overline{1, N}, \\ &j \neq k : \left(a_{ij} \neq a_{ik}\right) \wedge \left(a_{ji} \neq a_{ki}\right). \end{aligned} \tag{1}$$

Для диагональных латинских квадратов (ДЛК), являющихся специальным видом латинских квадратов, по определению дополнительно вводятся требования на отсутствие совпадающих элементов на главной и побочной диагонали латинского квадрата:

$$\forall i, j = \overline{1, N},\ i \neq j: \left(a_{ii} \neq a_{jj}\right) \wedge \left(a_{N-i+1,\, N-i+1} \neq a_{N-j+1,\, N-j+1}\right). \tag{2}$$

Латинский квадрат называется нормализованным, если элементы его первой строки и его первого столбца упорядочены по возрастанию. Несложно показать, что путем биективной перенумерации (перестановки) элементов множества *S* любого корректного латинского квадрата и последующей перестановки строк можно добиться его нормализации (указанное множество квадратов представляет собой класс эквивалентности из $N! \times (N-1)!$ латинских квадратов (множитель *N*! соответствует перестановкам элементов множества *S*, а множитель $(N-1)!$ – перестановкам строк квадрата со второй по *N*-ю). Для случая ДЛК процедура нормализации (представляющая собой последовательность перестановок строк и столбцов) может нарушить условие диагональности. При этом упорядочивание по возрастанию любой строки или столбца ДЛК может быть сделано с помощью последовательности перестановок элементов, т.к. эта процедура не нарушает условие диагональности.

Далее мы будем рассматривать ДЛК с упорядоченной первой строкой, т.е. строго говоря, такие ДЛК в общем случае не будут являться нормализованными. Обладая одним корректным ДЛК такого вида, можно тривиально получить остальные ДЛК, входящие с ним в один класс эквивалентности и эквивалентные ему с точностью до перенумерации элементов. Примеры соответственно норма-

лизованного ЛК порядка 10 и ДЛК порядка 10 с упорядоченной первой строкой приведены ниже:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1 & 2 & 9 & 4 & 3 & 6 & 7 & 8 & 0 & 8 \\ 2 & 9 & 3 & 1 & 7 & 0 & 5 & 8 & 4 & 6 \\ 3 & 4 & 1 & 2 & 8 & 7 & 9 & 6 & 5 & 0 \\ 4 & 3 & 5 & 9 & 2 & 1 & 8 & 0 & 6 & 7 \\ 5 & 6 & 4 & 8 & 1 & 2 & 0 & 9 & 7 & 3 \\ 6 & 5 & 8 & 7 & 0 & 3 & 2 & 1 & 9 & 4 \\ 7 & 8 & 6 & 0 & 9 & 4 & 1 & 2 & 3 & 5 \\ 8 & 7 & 0 & 5 & 6 & 9 & 3 & 4 & 1 & 2 \\ 9 & 0 & 7 & 6 & 5 & 8 & 4 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 7 & 2 & 4 & 9 & 0 & 6 & 5 & 1 & 3 & 8 \\ 8 & 3 & 6 & 7 & 5 & 9 & 0 & 2 & 4 & 1 \\ 2 & 6 & 8 & 5 & 1 & 7 & 4 & 0 & 9 & 3 \\ 5 & 8 & 9 & 1 & 7 & 0 & 3 & 4 & 6 & 2 \\ 9 & 4 & 1 & 2 & 8 & 3 & 7 & 6 & 0 & 5 \\ 4 & 7 & 5 & 6 & 9 & 1 & 8 & 3 & 2 & 0 \\ 3 & 0 & 7 & 8 & 2 & 4 & 1 & 9 & 5 & 6 \\ 6 & 5 & 0 & 4 & 3 & 2 & 9 & 8 & 1 & 7 \\ 1 & 9 & 3 & 0 & 6 & 8 & 2 & 5 & 7 & 4 \end{pmatrix}.$$

Несложно заметить, что рассматриваемые задачи построения ЛК и ДЛК имеют ярко выраженную комбинаторную природу, следствием чего является возможность использования для ее решения известных подходов, основанных на применении эвристик. Указанная задача относится к категории задач на существование (либо на подсчет, если по условию требуется определить число ЛК с заданными свойствами), для решения которых взвешивающие эвристики обычно не применяются, вместо чего используются вариации перебора с ограничениями [12–14] либо полиномиальное сведение данной задачи к другим задачам (например, к раскраске графов [15] или SAT-задачам [16]).

Однако указанная комбинаторная задача также может быть эффективно сведена к оптимизационной задаче путем минимизации числа нарушений условий (1) и (2) (схожий принцип может быть применен, например, при эвристической проверке пары графов на изоморфизм [17]):

$$C(A) \to \min,$$

что, в свою очередь, позволяет использовать для решения рассматриваемой задачи различные взвешивающие эвристики. Если в ходе применения какого-либо из эвристических подходов на их базе выполняется условие $C(A)=0$, это является свидетельством нахождения решения без нарушений, соответствующего всем ограничениям, в противном случае (при $C(A)>0$) – об отсутствии решений без нарушений или о неэффективности выбранного подхода.

При построении решения будем использовать принцип последовательного заполнения ячеек квадрата в направлении слева направо и затем сверху вниз $(a_{11}, a_{12}, ..., a_{1N}, a_{21}, a_{22}, ..., a_{2N}, ..., a_{NN})$, причем первую строку будем задавать в виде $[0\,1\,2 \ldots N-1]$ с целью получения ДЛК указанного выше вида. Для каждого очередного элемента квадрата a_{ij} будем производить определение множества $S_{ij} \subseteq S$ допустимых элементов, не нарушающих условий (1) и (2), с последующим выбором одного из них с использованием какой-либо эвристики. Если $S_{ij} = \varnothing$, то выбор очередного элемента квадрата без нарушения условий (1) и (2) невозможен, что будем отмечать символом «–» и инкрементом значения $C(A)$.

Пример подобной ситуации для ЛК приведен ниже:

$$A=\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 9 & 0 & 6 & 1 & 5 & 3 & 8 & 2 & 7 & 4 \\ 8 & 3 & 0 & 5 & 7 & 1 & 2 & 6 & 4 & - \\ 2 & 4 & 5 & 9 & 1 & 0 & 7 & 8 & 6 & 3 \\ 1 & 2 & 7 & 6 & 9 & 4 & 3 & 0 & 5 & 8 \\ 7 & 8 & 4 & 2 & 0 & 9 & 5 & 1 & 3 & 6 \\ 6 & 9 & 8 & 4 & 3 & 7 & 1 & 5 & 0 & 2 \\ 4 & 6 & 9 & 8 & 2 & - & 0 & 3 & 1 & 5 \\ 3 & 5 & 1 & 7 & 6 & 8 & 9 & 4 & 2 & 0 \\ 5 & 7 & 3 & 0 & 8 & 2 & 4 & 9 & - & 1 \end{pmatrix},$$

$$C(A)=3.$$

В приведенном примере при последовательном заполнении элементов квадрата возникновение нарушений обеспечивается элементами $a_{3,10}$, $a_{8,6}$ и $a_{10,9}$ благодаря нарушению условия (1). Так, например, для элемента $a_{3,10}$ множество стоящих левее элементов строки $S_{3,10}^{L}=\{0,1,2,3,4,5,6,7,8\}$, стоящих выше – $S_{3,10}^{U}=\{4,9\}$ и, соответственно, множество доступных элементов $S_{3,10}=S\setminus\left(S_{3,10}^{L}\cup S_{3,10}^{U}\right)=\varnothing$.

Наиболее простой эвристический подход – случайный перебор (англ. Random Search, сокр. RS) – базируется на идее равновероятного выбора одного из элементов множества $S_{ij}=\left\{s_{ij}^{1},s_{ij}^{2},...,s_{ij}^{M}\right\}$, $M\left(S_{ij}\right)=\left|S_{ij}\right|$, а соответствующая ему эвристика может быть записана в виде

$$f_{RS}\left(s_{ij}^{l}\right)=r_k,\ l=\overline{1,M\left(S_{ij}\right)}, \qquad (3)$$

где r_k – очередное псевдослучайное число.

С использованием данной эвристики был организован вычислительный эксперимент, в ходе которого с использованием разработанной однопоточной программной реализации был осуществлен поиск ДЛК различного порядка с ограничением на время эксперимента, равным 30 с (здесь и далее для экспериментов был использован процессор Intel Atom N270 @ 1,6 ГГц, ядро Diamondville).

Таблица 1

Число решений с $C(A)\le 1$, найденных методом случайного перебора, в зависимости от размерности задачи (порядка квадрата *N*)

N	Число найденных решений
6	68
7	4
8	1
9	0
10	0

Результаты эксперимента показывают, что с ростом размерности задачи эффективность случайного перебора существенно падает и для поиска решений, удовлетворяющих условиям (1) и (2), могут потребоваться существенные затраты машинного времени. С целью повышения эффективности необходимо какое-либо эвристическое ранжирование элементов множеств S_{ij} с целью выбора наиболее перспективных из них ввиду стремления к минимизации числа потенциальных нарушений для последующих элементов формируемого квадрата без выполнения время затратных проверок (которые в теории могут быть выполнены, например, методом полного перебора, однако на практике, как правило, неприемлемо трудоемки).

Для этого попытаемся оценить число возможных вариантов выбора различных элементов для еще не заполненных ячеек квадрата, что для ЛК может быть представлено в следующем виде:

$$f_{ij}^{(x)}=\underbrace{\sum_{k=j+1}^{N}\left|S_{ik}\right|}_{\text{по строке}}+\underbrace{\sum_{k=i+1}^{N}\left|S_{kj}\right|}_{\text{по столбцу}}= \qquad (4)$$

$$=\sum_{k=j+1}^{N}\left|S_{ik}\right|+(N-i)\left|S_{i+1,j}\right|\to\max,$$

где $x \in S_{ij}$ – один из элементов множества S, помещение которого в (i, j)-ю ячейку не приводит к нарушению условия (1) и, соответственно, к появлению нарушения.

Пример вычисления значения функции (4) показан на рис. 1.

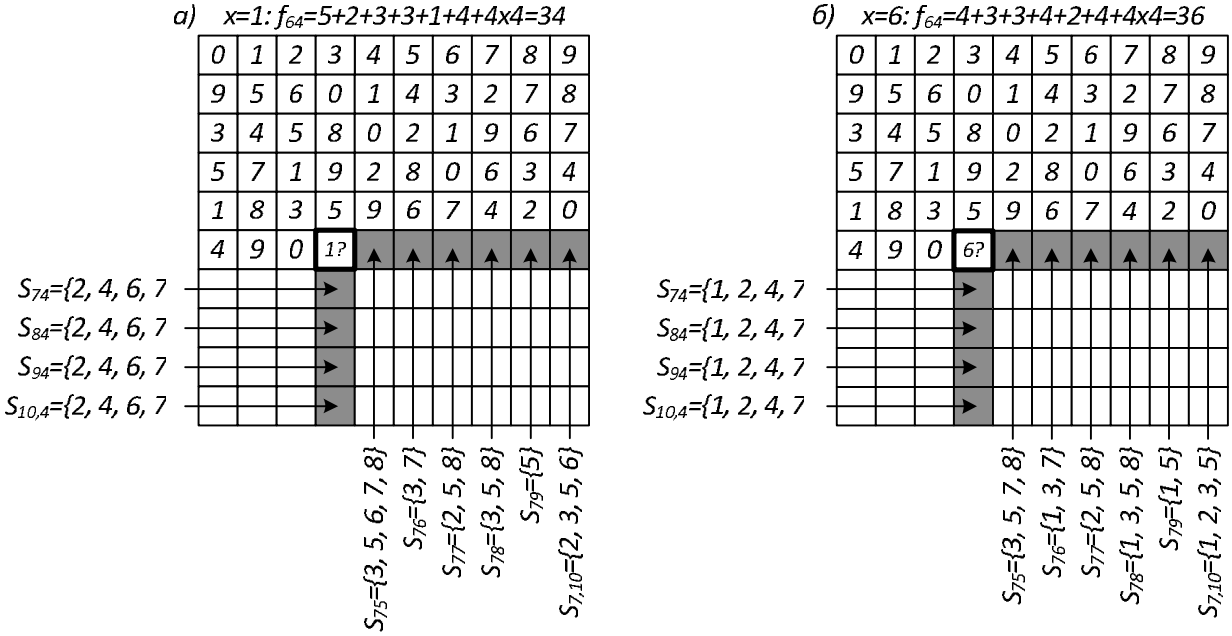


Рис. 1. Пример, поясняющий вычисления эвристики (4) для ЛК на примере выбора значения ячейки a_{64}. Цифрами указаны заполненные ранее ячейки; жирным выделена текущая ячейка, для которой производится выбор элемента x; выбор значений в белых пустых ячейках не зависит от текущего значения x в отличие от серых пустых ячеек

При поиске ДЛК необходим учет возможных диагональных элементов, а число возможных вариантов выбора различных элементов для еще не заполненных ячеек квадрата может быть представлено в следующем виде:

$$g_{ij}^{(x)} = f_{ij}^{(x)} + \alpha_{ij} \underbrace{\sum_{k=i+1}^{N} \left|S_{kk}\right|}_{\text{главная}} + \beta_{ij} \underbrace{\sum_{k=i+1}^{N} \left|S_{k,\,N-k}\right|}_{\text{побочная}} \to \max, \quad (5)$$

где $\alpha_{ij} = \begin{cases} 0, i \neq j \\ 1, i = j \end{cases}$ – двоичный признак того, что (i, j)-я ячейка расположена на главной диагонали, $\beta_{ij} = \begin{cases} 0, i + j \neq N \\ 1, i + j = N \end{cases}$ – на побочной диагонали.

При рассмотрении данной задачи с позиции дерева комбинаторного перебора использование эвристик (4) и (5) приводит к выбору элементов с максимальным числом ветвей в поддеревьях (максимальной арностью узлов на нижележащих уровнях), что теоретически должно обеспечивать бо**л**ьшую вероятность получения корректного решения.

Простейшим способом практического применения эвристик является их использование в рамках жадного подхода (англ. Greedy, сокр. G) путем использования формул (4) или (5) в зависимости от задачи в неизменном виде:

$$f_G\left(s_{ij}^{l}\right) = g_{ij}^{\left(s_{ij}^{l}\right)} \to \max, l = \overline{1, M\left(S_{ij}\right)}. \quad (6)$$

Данный подход был опробован на практике при поиске ДЛК различного порядка, результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Число нарушений в решении, найденном с использованием жадного подхода, в зависимости от размерности задачи (порядка квадрата *N*) при поиске ДЛК

N	Число нарушений
3	2
4	3
5	4
6	5
7	5
8	8
9	12
10	12

Найденные решения для случаев $N = 3, 4, 5$ и 10 приведены ниже:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 2 & - & 0 \\ 1 & 0 & - \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 0 & 1 \\ 2 & - & 3 & 0 \\ 1 & 0 & - & - \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 2 & 0 & 1 & 3 \\ 3 & 0 & - & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 4 & - & 0 \\ - & 4 & 3 & 0 & - \end{pmatrix} \text{ и}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 9 & 7 & 0 & 6 & 5 & 8 & 4 & 3 & 2 & 1 \\ 8 & 0 & 6 & 7 & 9 & 4 & 5 & 1 & 3 & 2 \\ 7 & 8 & 5 & 4 & 0 & 9 & 3 & 6 & 1 & - \\ 6 & 5 & 8 & 0 & 3 & 7 & 9 & 4 & - & - \\ 5 & 6 & 7 & 8 & - & 2 & 0 & 9 & 4 & 3 \\ 4 & 3 & 9 & 5 & 6 & 0 & 8 & 2 & 7 & - \\ 3 & 4 & - & 9 & 7 & 6 & 2 & 5 & 0 & 8 \\ 2 & - & 4 & 1 & 8 & 3 & 7 & 0 & 9 & 6 \\ - & 2 & 3 & - & 1 & - & - & 8 & 5 & - \end{pmatrix}.$$

Найденные решения далеки от корректных, поэтому в чистом виде эвристики (4) и (5) или им подобные использовать нельзя (в противном случае можно было бы утверждать, что найден полиномиальный алгоритм нахождения ДЛК на их базе).

Однако они допускают использование совместно со стратегией взвешенного случайного перебора (англ. Wighted Random Search, сокр. WRS) [4], эвристика для которой может быть записана как

$$f_{WRS}\left(s_{ij}^{l}\right) = \\ = g_{ij}^{\left(s_{ij}^{l}\right)} \cdot \left(1 + 2d\left(r_k - 0{,}5\right)\right) \to \max, \quad (7) \\ l = \overline{1, M\left(S_{ij}\right)},$$

где d – настроечный параметр, определяющий степень разброса относительно жадного значения $g_{ij}^{\left(s_{ij}^{l}\right)}$.

При ее использовании прежде всего необходимо выполнить метаоптимизацию, в ходе которой необходимо найти оптимальное значение степени разброса d^*. Для этого был организован вычислительный эксперимент, в рамках которого определялось число *n* ДЛК порядка 6, найденное за 30 с, в зависимости от различных значений *d* (рис. 2).

Полученные зависимости $n(d)$ позволяют сделать вывод о том, что оптимальное значение степени разброса лежит в пределах $0{,}15 < d < 0{,}21$, для дальнейших экспериментов было выбрано значение $d^* = 0{,}17$. С его использованием был организован вычислительный эксперимент, аналогичный рассмотренному выше эксперименту с применением метода случайного перебора, число найденных ДЛК приведено в таблице 3.

Таблица 3

Число решений с $C(A) \le 1$, найденных методами случайного и взвешенного случайного перебора, в зависимости от размерности задачи (порядка квадрата *N*) при поиске ДЛК

N	RS	WRS
6	68	839
7	4	10
8	1	4
9	0	3
10	0	0

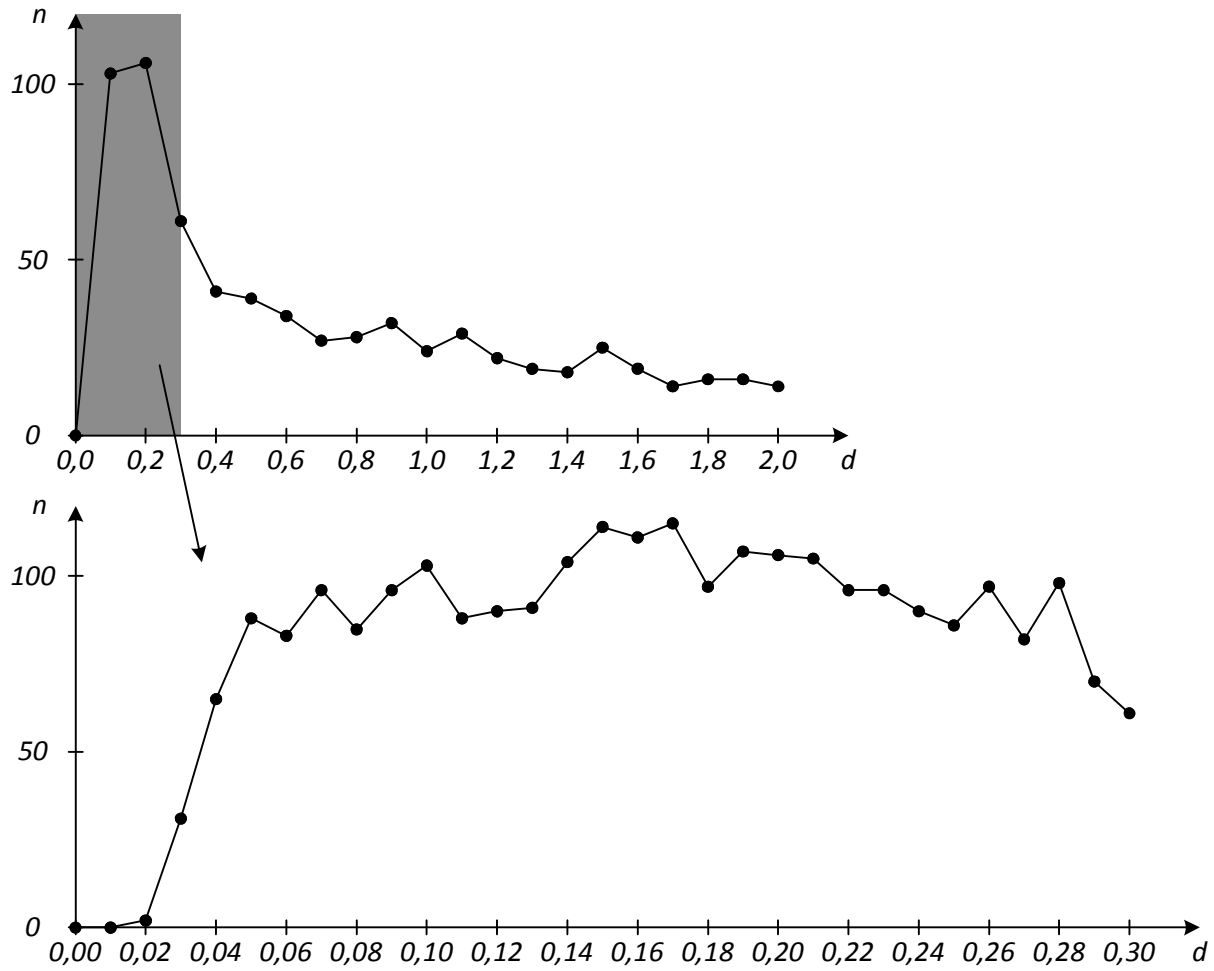


Рис. 2. Зависимость числа *n* найденных ДЛК от степени разброса *d*

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что использование эвристик вида (4) и (5) совместно со стохастическими методами оправданно: несмотря на б**о**льшие вычислительные затраты, необходимые на построение одного решения, в целом число решений, полученных в единицу времени, также оказывается б**о**льшим. Однако при построении ДЛК порядка 10 отведенных затрат вычислительного времени оказывается недостаточно для нахождения хотя бы одного решения. При этом опыт расположения элементов прошлых решений, найденных на предыдущих итерациях, никак не используется при построении последующих решений.

Данный недостаток можно исправить путем использования эвристики, соответствующей муравьиной [5–7] стратегии построения решения (англ. Ant Colony, сокр. AC), при которой, следуя работе [7], производится пометка феромоном соответствий в двудольном графе, одной доле которого соответствуют $(N-1)\times N$ ячеек квадрата (первая строка фиксирована!), а другой – N элементов множества S:

$$p_{ij}^{(x)} = \left[g_{ij}^{(x)}\right]^{\alpha}\left[\tau_{ij}^{(x)}\right]^{\beta} r_k \to \max; \quad (8)$$

$$f_{AC}\left(s_{ij}^{l}\right) = p_{ij}^{\left(s_{ij}^{l}\right)} \to \max, l = \overline{1, M\left(S_{ij}\right)}, \quad (9)$$

где $\tau_{ij}^{(x)}$ – количество феромона на ребре двудольного графа между (i, j)-м элементом квадрата и x-м элементом множества S;

α и β – настроечные параметры, определяющие реакцию муравьев на приращение качества решения (эвристика

$g_{ij}^{(x)}$) и количество феромона от предыдущих поколений $\tau_{ij}^{(x)}$.

Как уже было отмечено в работе [6], использование эвристики в виде (8) и (9) позволяет обойтись без нормирования вероятностей $p_{ij}^{(x)}$ выбора элементов x множества S_{ij}, что незначительно экономит вычислительные ресурсы. Начальное значение феромона на ребрах будем выбирать равным τ_0 (настроечный параметр), после выполнения t-й итерации движения муравьев и получения в ее результате квадрата A_t с числом нарушений $C(A_t)$ будем производить испарение феромона $\left[\tau_{ij}^{(x)}\right]^{(t)} = \gamma\left[\tau_{ij}^{(x)}\right]^{(t-1)}$, где настроечный параметр $0 < \gamma \le 1$ регулирует темп испарения, и добавление новой порции феромона $\Delta\tau = \dfrac{Q}{C(A_t)+1}$ для ребер, соответствующих выбранным элементам квадрата, где Q – количество феромона в распоряжении одного муравья (настроечный параметр), единица в знаменателе добавляется к функции $C(A_t)$ с целью избегания деления на ноль при нахождении корректного решения.

Перед использованием данной «муравьиной» эвристики на практике, как и в случае взвешенного случайного перебора, необходимо выполнение метаоптимизации, которая в данном случае является более времязатратной ввиду необходимости поиска экстремума в пространстве, образованном пятью настроечными параметрами $(\alpha, \beta, \tau_0, \gamma, Q)$. В качестве метода оптимизации был использован метод покоординатного спуска, в результате чего был найден следующий набор оптимальных значений настроечных параметров:

$$\alpha^* = 100, \beta^* = 1{,}1, \tau_0^* = 1{,}0,$$
$$\gamma^* = 0{,}99999, Q = 1{,}0.$$

Соответствующие зависимости числа решений, найденных за 10 000 итераций работы алгоритма, подтверждающие правильность выбора значений настроечных параметров, приведены на рис. 3.

В выполненных экспериментах размер колонии был выбран равным 1 ввиду того, что полученные результаты даже с учетом данного упрощения базового алгоритма [5] оказываются весьма неплохими. Приведенные результаты метаоптимизации позволяют сделать ряд интересных выводов.

Прежде всего, в указанной задаче баланс между важностью эвристики (5) (параметр α) и опытом прошлых поколений (параметр β) явно смещен в пользу первого компонента, что эмпирически подтверждает правильность идеи, лежащей в основе эвристики (5).

Значение параметра α по результатам вычислительных экспериментов хотелось бы дополнительно увеличить, однако при этом начинают появляться ошибки, связанные с возникновением переполнения при выполнении расчетов с плавающей точкой (англ. floating point overflow).

Параметр β оказывает гораздо меньшее значение на результат поиска, однако полное его исключение $(\beta = 0)$ нецелесообразно ввиду уменьшения числа найденных решений (в организованном эксперименте с 3 428 при $\beta = 1{,}1$ до 2 363 при $\beta = 0$). С другой стороны, при $\beta > 1$ возможны ситуации, когда число решений значительно снижается, что связано с попаданием алгоритма в локальные экстремумы, ввиду чего в качестве результата оптимизации выбрано компромиссное значение $\beta^* = 1{,}1$.

То же самое поведение наблюдается для параметра γ, значения которого выбирались близкими к единице, но не превосходящими ее. При значениях $0{,}9 \le \gamma \le 0{,}99$ большинство решений далеки от корректных по числу нарушений $(C(A) \ge 2)$ ввиду попадания в локальные экстремумы, в то время как дополнитель-

ное снижение темпа испарения феромона вызывает рост числа различных решений, ввиду чего было выбрано значение $\gamma^* = 0{,}99999$.

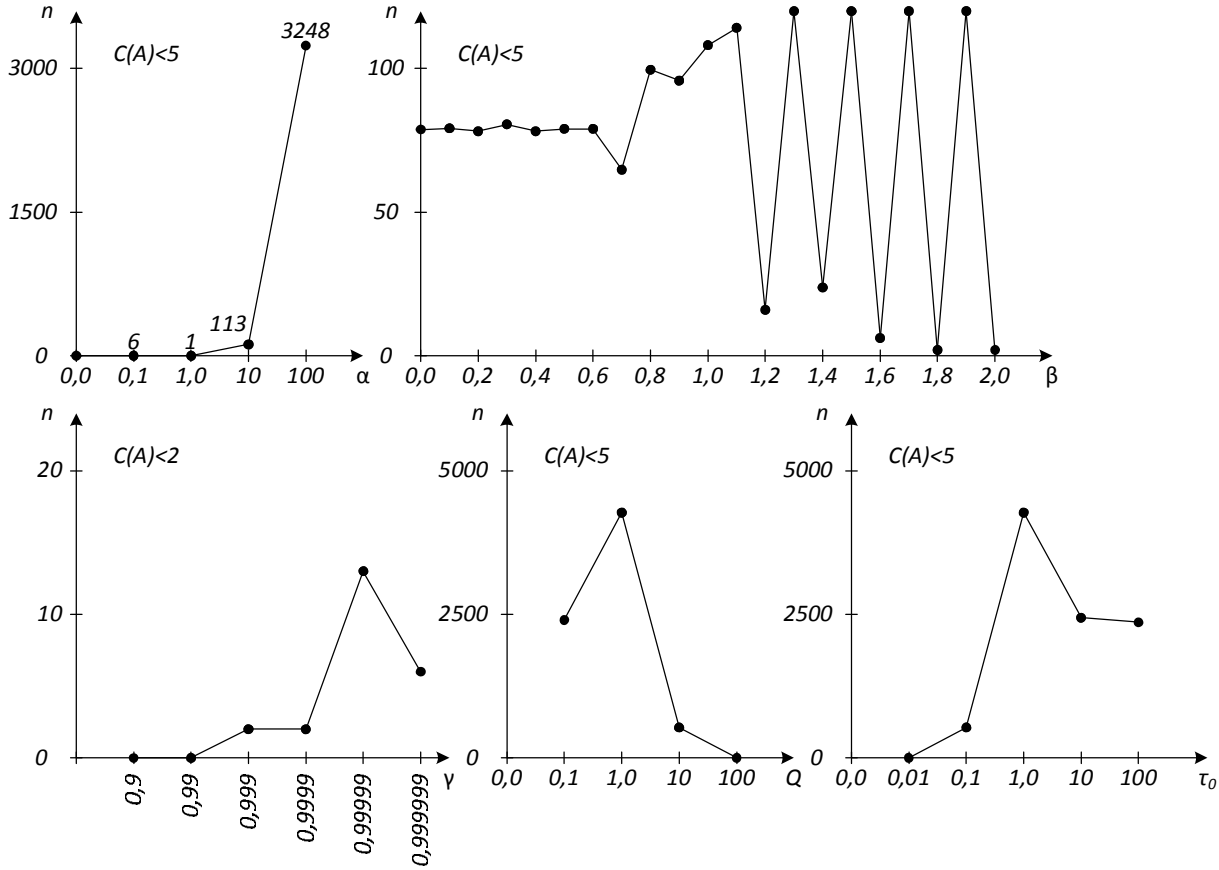


Рис. 3. Результаты метаоптимизации подхода на базе «муравьиной» эвристики

Для зависимостей числа решений n от значений Q и τ_0 имеют место вполне определенные максимумы (см. рис. 3), позволяющие однозначно выбрать их оптимальные значения.

С использованием найденных значений настроечных параметров алгоритма муравьиной колонии был организован вычислительный эксперимент по поиску ДЛК различного порядка, его результаты приведены в таблице 4 (затраты вычислительного времени и процессор соответствуют рассмотренным выше экспериментам, результаты которых приведены в таблицах 1 и 3).

Анализ результатов показывает высокую эффективность алгоритма муравьиной колонии в рассматриваемой задаче поиска ДЛК по сравнению с алгоритмами случайного и взвешенного случайного перебора.

Таблица 4

Число решений с $C(A) \le 1$, найденных методами случайного, взвешенного случайного перебора и алгоритмом муравьиной колонии, в зависимости от размерности задачи (порядка квадрата N) при поиске ДЛК

N	RS	WRS	AC
6	68	839	9 027
7	4	10	10 050
8	1	4	64
9	0	3	20
10	0	0	6

К его недостаткам можно отнести особенность, связанную с возможностью нахождения на разных итерациях работы

совпадающих квадратов, вероятность чего при использовании случайного и взвешенного случайного перебора близка к нулю.

С целью сопоставления качества решений эвристических методов с результатами переборных методов также был реализован метод полного перебора с ограничением на число анализируемых ветвей дерева комбинаторного перебора (англ. Limited Brute Force, сокр. LBF). Ограничение было реализовано ввиду невозможности перебора всех ветвей дерева за разумное время. Эксперименты с его программной реализацией показали, что решения (ДЛК) расположены в пространстве поиска существенно неравномерно и во многом определяются, например, начальными значениями элементов квадрата. Так при выборе в качестве начальных значений второй строки следующих элементов $(9\ \ 7\ \ 0\ \ 6\ \ 5\ \ ?\ \ ?\ \ ?\ \ ?\ \ ?)$ среднее время между нахождением различных квадратов составило 132 мс, а при выборе диапазона $(2\ \ 3\ \ 1\ \ 0\ \ 5\ \ ?\ \ ?\ \ ?\ \ ?\ \ ?)$ – около 300 мс (для нахождения первого решения при этом необходимо около 1 минуты, далее решения начинают находиться более менее равномерно).

Анализ решений, полученных с использованием алгоритма муравьиной колонии показывает, что данный подход, по-видимому, «чувствует» данную особенность задачи, т.к. большинство решений, найденных с его использованием при различных начальных значениях генератора псевдослучайных чисел, имеют схожую структуру – например, элементы второй строки квадрата для них имеют следующий вид:

$$(9\ \ 2\ \ 0\ \ 7\ \ 8\ \ 6\ \ 4\ \ 1\ \ 3\ \ 5),$$
$$(9\ \ 5\ \ 0\ \ 6\ \ 8\ \ 7\ \ 3\ \ 2\ \ 1\ \ 4),$$
$$(9\ \ 2\ \ 0\ \ 6\ \ 8\ \ 7\ \ 3\ \ 1\ \ 4\ \ 5),$$
$$(9\ \ 6\ \ 0\ \ 8\ \ 7\ \ 3\ \ 1\ \ 4\ \ 2\ \ 5),$$
$$(9\ \ 3\ \ 0\ \ 8\ \ 7\ \ 6\ \ 2\ \ 1\ \ 4\ \ 5).$$

Несложно заметить, что элемент a_{21} всегда принимает значение 9, a_{23} – всегда 0, элемент $a_{2,10}$ часто имеет значение 5 и т.д. Эта особенность задачи может быть использована следующим образом: эвристические методы (RS, WRS, AC и пр.) могут применяться для нахождения перспективных областей в пространстве поиска, в окрестности которых может быть организовано уточнение решений с использованием стратегии LBF.

С целью более масштабного сопоставления рассмотренных выше эвристических методов был организован вычислительный эксперимент, в ходе которого оценивалось количество ДЛК порядка 10, найденных за $t = 16$ часов на процессоре Intel Core i7 4770 @ 3,9 ГГц (ядро Haswell) при использовании однопоточной программной реализации (табл. 5, 6).

Таблица 5

Результаты нахождения ДЛК порядка 10, выраженные в числе найденных квадратов

Метод	$C(A) \le 1$	$C(A) = 0$
RS	7 934	124
WRS	13 341	352
AC	179 387	9 422
LBF	– (не оценивалось)	346 572

Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов. Прежде всего необходимо отметить, что поставленная задача в достаточной степени удобна для метода полного перебора с ограничениями (LBF), что подтверждается большим числом найденных решений. В то же время на ее примере можно сделать вывод о целесообразности ее сведения к оптимизационной задаче и последующего применения взвешивающих эвристик совместно со стохастическими методами (RS, WRS, AC), что увеличивает найденное число решений при использовании эвристических методов, базирующихся на по-

следовательном выборе элементов формируемого квадрата. Как уже было отмечено выше, возможно совместное использование эвристических методов для поиска перспективных областей пространства поиска и метода полного перебора с ограничениями для уточнения решений в указанной области. Полученные выводы и рекомендации могут быть полезны при решении более сложных комбинаторных задач, например, связанных с поиском пар или троек попарно ортогональных ДЛК [18].

Таблица 6

Примеры ДЛК порядка 10, найденные в ходе эксперимента

RS:	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 7 2 4 9 0 6 5 1 3 8 8 3 6 7 5 9 0 2 4 1 2 6 8 5 1 7 4 0 9 3 5 8 9 1 7 0 3 4 6 2 9 4 1 2 8 3 7 6 0 5 4 7 5 6 9 1 8 3 2 0 3 0 7 8 2 4 1 9 5 6 6 5 0 4 3 2 9 8 1 7 1 9 3 0 6 8 2 5 7 4	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 6 9 8 0 3 4 1 5 2 7 2 7 5 6 9 1 3 4 0 8 5 3 1 7 8 9 0 6 4 2 1 2 7 9 6 8 4 0 3 5 9 0 4 5 7 3 8 2 6 1 4 8 3 1 0 7 2 9 5 6 7 4 6 2 1 0 5 8 9 3 8 5 9 4 2 6 7 3 1 0 3 6 0 8 5 2 9 1 7 4	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 6 7 5 8 9 2 0 4 1 3 5 0 4 2 7 3 1 6 9 8 8 4 7 6 2 9 3 1 0 5 1 6 3 4 8 7 5 9 2 0 2 3 6 9 0 1 8 5 7 4 3 8 0 5 1 6 9 2 4 7 7 9 8 0 5 4 2 3 6 1 9 2 1 7 3 8 4 0 5 6 4 5 9 1 6 0 7 8 3 2
WRS:	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 4 6 9 2 5 3 0 8 7 1 2 3 4 9 0 6 7 5 1 8 9 5 3 8 6 1 2 4 0 7 8 7 5 1 9 0 3 2 4 6 6 8 0 5 3 7 4 1 9 2 3 0 7 6 2 8 1 9 5 4 5 2 8 7 1 4 9 3 6 0 7 4 1 0 8 9 5 6 2 3 1 9 6 4 7 2 8 0 3 5	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 2 9 8 0 1 6 7 3 4 5 1 2 6 9 7 0 4 5 3 8 9 6 5 4 0 3 8 1 7 2 4 5 7 2 8 1 3 9 6 0 5 8 3 1 2 7 9 4 0 6 8 0 4 7 3 9 5 6 2 1 3 4 0 6 9 8 1 2 5 7 7 3 9 5 6 2 0 8 1 4 6 7 1 8 5 4 2 0 9 3	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 3 8 0 2 7 4 1 9 6 5 5 4 9 8 0 6 7 2 1 3 8 2 5 6 9 3 4 1 7 0 2 9 7 1 5 8 3 0 4 6 1 5 8 4 3 7 9 6 0 2 6 7 3 5 1 0 2 8 9 4 9 3 1 7 6 2 0 4 5 8 4 0 6 9 2 1 8 5 3 7 7 6 4 0 8 9 5 3 2 1
AC:	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 9 7 0 5 6 8 1 4 2 3 7 2 6 0 9 1 3 5 4 8 2 6 3 8 7 9 0 1 5 4 6 0 8 4 5 7 2 9 3 1 8 3 5 9 1 4 7 2 0 6 4 5 1 6 3 2 9 8 7 0 1 9 4 7 2 0 8 3 6 5 5 8 9 2 0 3 4 6 1 7 3 4 7 1 8 6 5 0 9 2	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 9 7 0 6 8 4 1 2 5 3 7 5 8 0 9 1 2 6 3 4 8 6 3 4 7 9 0 5 1 2 6 0 4 1 5 7 3 9 2 8 1 8 6 9 3 2 5 4 0 7 5 2 7 8 1 3 9 0 4 6 4 9 1 2 6 0 8 3 7 5 3 4 9 5 2 8 7 1 6 0 2 3 5 7 0 6 4 8 9 1	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 9 3 0 6 7 8 1 5 2 4 2 9 5 0 8 1 7 3 4 6 5 4 8 7 3 9 0 6 1 2 3 0 7 1 2 6 8 4 9 5 7 6 1 9 5 4 2 8 0 3 4 5 3 8 6 2 9 0 7 1 6 8 4 2 9 0 5 1 3 7 8 7 9 5 1 3 4 2 6 0 1 2 6 4 0 7 3 9 5 8
LBF:	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 9 7 0 6 5 8 4 3 2 1 8 0 6 7 9 4 5 1 3 2 7 8 5 4 0 9 3 2 1 6 6 5 8 1 2 0 9 4 7 3 5 9 1 0 8 3 2 6 4 7 2 4 3 5 6 7 1 9 0 8 1 2 7 9 3 6 0 8 5 4 3 6 4 8 1 2 7 5 9 0 4 3 9 2 7 1 8 0 6 5	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 9 7 0 6 5 8 4 3 2 1 8 0 6 7 9 4 5 1 3 2 7 8 5 4 0 9 3 2 1 6 6 5 8 1 2 0 9 4 7 3 5 9 1 0 8 3 2 6 4 7 2 4 3 5 6 7 1 9 0 8 1 2 7 9 3 6 0 8 5 4 3 6 4 2 7 1 8 5 9 0 4 3 9 8 1 2 7 0 6 5	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 9 7 0 6 5 8 4 3 2 1 8 0 6 7 9 4 5 1 3 2 7 8 5 4 0 9 3 2 1 6 6 5 8 1 2 0 9 4 7 3 5 9 1 0 8 3 2 6 4 7 2 4 3 5 6 7 1 9 0 8 3 2 7 9 1 6 0 8 5 4 1 6 4 8 3 2 7 5 9 0 4 3 9 2 7 1 8 0 6 5

Авторы статьи выражают благодарность В.В. Григору и В.А. Носову за ряд ценных замечаний, полученных в ходе подготовки рукописи к изданию.

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания для ЮЗГУ на 2014–2017 гг., номер НИР 2246, а также в рамках научной школы НШ-2357.2014.8. Работа получила частичную поддержку РФФИ (гранты 14-07-00403-А и 15-07-07891-А) и Совета по грантам для молодых ученых при Президенте РФ (стипендия СП-1184.2015.5, грант ВНШ-5007.2014.9).

Список литературы

1. McKay B.D., Rogoyski E. Latin Squares of Order 10 // The Electronic Journal of Combinatorics. – 1995. – Vol. 2.

2. Метод случайного перебора в задаче построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов / Э.И. Ватутин, Д.В. Колясников, И.А. Мартынов, В.С. Титов // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов. – Барнаул: Барнаул, 2014. – С. 115–125.

3. Ватутин Э.И., Колясников Д.В., Титов В.С. Анализ результатов применения метода случайного перебора в задаче поиска разбиений граф-схем параллельных алгоритмов // Известия Южного федерального университета. Серия: Технические науки. – 2014. – № 12 (161). – С. 102–110.

4. Метод взвешенного случайного перебора для решения задач дискретной комбинаторной оптимизации / Э.И. Ватутин, Е.Н. Дремов, И.А. Мартынов, В.С. Титов // Известия ВолГТУ. Серия: Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. – 2014. – № 10 (137), вып. 9. – С. 59–64.

5. Dorigo M. Optimization, Learning and Natural Algorithms // PhD thesis. Politecnico di Milano, Italie, 1992.

6. Ватутин Э.И., Титов В.С. Анализ результатов применения алгоритма муравьиной колонии в задаче поиска пути в графе при наличии ограничений // Известия Южного федерального университета. Серия: Технические науки. – 2014. – № 12 (161). – С. 111–120.

7. Ватутин Э.И., Титов В.С. Об одном подходе к использованию алгоритма муравьиной колонии при решении задач дискретной комбинаторной оптимизации // Интеллект – 2015. – Тула, 2015.

8. Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P. Optimization by Simulated Annealing // Science. – 1983. – Vol. 220, N 4598. – P. 671–680.

9. Ватутин Э.И., Титов В.С. Параметрическая оптимизация алгоритма имитации отжига на примере решения задачи поиска кратчайшего пути в графе // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015.

10. Ватутин Э.И., Мартынов И.А., Титов В.С. Способ обхода тупиков при решении задач дискретной оптимизации с ограничениями // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2014). – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2014. – С. 313–317.

11. Colbourn C.J., Dinitz J.H. Handbook of Combinatorial Designs, 2nd ed. (Discrete Mathematics and Its Applications). Chapman & Hall/CRC. 2006.

12. Посыпкин М.А., Сигал И.Х. Комбинированный параллельный алгоритм решения задачи о ранце // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2008. – № 4. – С. 50–58.

13. Колпаков Р.М., Посыпкин М.А. Верхняя и нижняя оценки трудоемкости метода ветвей и границ для задачи о ранце // Дискретная математика. – 2010. – Т. 22, № 1. – С. 58–73.

14. Колпаков Р.М., Посыпкин М.А. Об оценках вычислительной сложности варианта параллельной реализации метода ветвей и границ для задачи о ранце // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2011. – № 5. – С. 74–82.

15. DIMACS Graphs [Electronic resource] // Benchmark Instances and Best Upper Bounds. – URL: http://www.info.univ-angers.fr/pub/porumbel/graphs/.

16. Prestwich S.D. CNF Encodings // Handbook of Satisfiability. – 2009. – P. 75–97.

17. Ватутин Э.И. Эвристический подход к распознаванию изоморфизма графов // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации (Распознавание – 2015). – Курск, 2015. – С. 80–83.

18. Заикин О.С., Кочемазов С.Е. Поиск пар ортогональных диагональных латинских квадратов порядка 10 в проекте добровольных распределенных вычислений SAT@home // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2015. – Т. 4, № 3. – С. 95–108.

Получено 10.06.15

E.I. Vatutin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: evatutin@rambler.ru)

A.D. Zhuravlev, Programmer, Internet portal BOINC.ru (Samara) (e-mail: alexone07@mail.ru)

O.S. Zaikin, Candidate of Engineering Sciences, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of RAS (Irkutsk) (e-mail: zaikin.icc@gmail.com)

V.S. Titov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: titov-kstu@rambler.ru)

FEATURES OF USING WEIGHTING HEURISTICS IN THE PROBLEM OF FINGING DIAGONAL LATIN SQUARES

A description of the strategy of using stochastic methods based on the weighting heuristics in problem searching diagonal Latin squares is given. It is shown that source problem of the existence of solutions can be effectively reducted to problem of find optimal solution. This class of the problems corresponds to a discrete combinatorial problems area that are can be solved by using heuristic approaches such as random, weighted random search and ant colony optimization approaches. Article is contain detailed description of corresponding weighting heuristics, features of meta-optimization and results of applying selected approaches within solving problem of finding diagonal Latin squares of different order. Also with using Brute Force approach with limited number of leaves of the tree it is shown that decisions arranged significantly irregularly that allows to use heuristic approaches for exploration of space followed by clarifying its promising areas.

***Key words**: Latin squares, discrete combinatorial optimization, heuristic methods, weighted random search, ant colony optimization, meta-optimization.*

УДК 004.032

П.В. Лоторев, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: pashik_email@mail.ru)

А.Г. Курочкин, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: ak76@kursk.ru)

А.В. Гривачев, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: Garpun-22@mail.ru)

С.Г. Емельянов, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: rector@swsu.ru)

ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ

В статье разработана структура системы поддержки принятия решений для управления группой роботов в условиях активно воздействующей внешней среды. Главная новизна структуры заключается в разработке выделенных подсистем анализа и реконфигурации, а также подсистемы позиционирования, осуществляющих динамическое перераспределение позиций роботов.

***Ключевые слова**: обработка данных и знаний, продукционный вывод, реконфигурация группы роботов.*

***

Введение

Одним из основных направлений в создании систем поддержки принятия решений (СППР) является повышение их интеллектуальных возможностей за счет совместной обработки данных и знаний, имеющих атрибутивную и пространственную компоненты. Новое поколение СППР должно комплексно сочетать обработку хорошо структурированной информации, представленной в БД [1,2], и слабоструктурированных данных о пространственно-топологических свойствах объектов, ретроспективных данных, содержащих скрытые закономерности. Другими словами, СППР должны стать гибридными по структуре и адаптивными по функциональным возможностям.

Перспективным классом СППР нового поколения (гибридных СППР) являются распределенные системы управления для робототехнических систем – интеллектуальных роботов (ИР), способных скоординированно работать в составе группы в динамично меняющейся внешней среде, имеющей активные объекты воздействия [3, 4].

Метод решения

Современный этап развития интеллектуальных систем характеризуется расширительным уточнением систем поддержки принятия решений (СППР) как распределенной совокупности взаимосвязанных подсистем информационного, расчетного, моделирующего и экспертного назначений. Под информационной подсистемой традиционно понимается совокупность баз данных, созданных на основе объектно-ориентированных БД и содержащих числовую, символьную, картографическую и другие типы данных. Ядром СППР является экспертная и моделирующая подсистемы, представляющие собой специализированную программу для поддержки недетерминированных поисково-переборных методов на основе заложенных в базу экспертных знаний в заданной предметной области.

Современный этап создания СППР основан на методах и технологиях искусственного интеллекта. Как развитие [5] в структуру СППР, содержащей следующие блоки:

1) систему обработки знаний (СОЗ);
2) компоненту приобретения знаний (КПЗн);
3) лингвистический процессор (Лингв. пр-р);
4) компоненту объяснения рекомендаций (КОРез-та);
5) машину логического вывода (МЛВ);
6) базу знаний (БЗн) и рабочую память данных (РП);
7) модуль объектного согласования типов данных (МОСД),

дополнительно вводятся расчетно-логические модели анализа и визуализации позиций роботов (РЛМАВ) и локальный модуль координации расположения робота (МКР) с учетом характеристик главной цели.

На рис.1. приведена модифицированная структура интеллектуальной СППР, ориентированной на обработку данных в составе группы ИР.

Основными компонентами структуры СППР являются базы данных и знаний о предметной области и машина логического вывода (МЛВ). БЗ предназначена для генерации и поддержки динамической модели знаний о возможных событиях и адекватных реакциях на них. Традиционно в качестве моделей представления знаний используются логические, продукционные, сетевые и фреймовые модели. Наиболее близким для ИР, имеющих развитые средства связи с внешним миром (видео, сенсоры, тепловизоры и др.), является продукционная модель, непосредственно переводящая внешние реакции в ответные действия по изменению как состояния ИР, так и объектов внешнего мира.

Главная особенность в работе МЛВ определяется необходимостью осуществления совместных поисковых, расчетно-логических действий и анализа простран-

ственного расположения роботов на основе продукционного аппарата [6].

Основное внимание в создании интеллектуальных СППР должно быть уделено следующим вопросам:

1. Информатизация экспертных знаний в плане построения методов поиска решений, включая недетерминированный и параллельный поиск, для обработки текущих и стратегических данных в условиях динамично меняющейся внешней обстановки.

2. Ориентация на автономные вычислительные средства с возможностью параллельной обработки информации на основе объектной модели представления данных и знаний о предметной области.

3. Внедрение ГИС-методов и средств, которые тесно связаны с внутренними представлениями объектов предметной области в виде визуальных иерархически организованных данных от различных источников и описываемых в виде абстрактных сущностей со своими собственными способами поиска, индексации и обработки.

Опыт эксплуатации промышленных и коммерческих ЭС и оболочек с разными моделями представления знаний показал следующее. Замена процедур обработки информации, для которой характерно визуальное представление, на символьную обработку приводит к резкому снижению эффективности обработки и часто не обеспечивает нахождения решения задачи или резко снижает качество этого решения. Доминирующая роль в анализе и последующем принятии решения при достижении цели принадлежит пространственным данным о позициях роботов, их интегральной оценке при визуализации размещения роботов и активных объектов внешней среды [5,7].

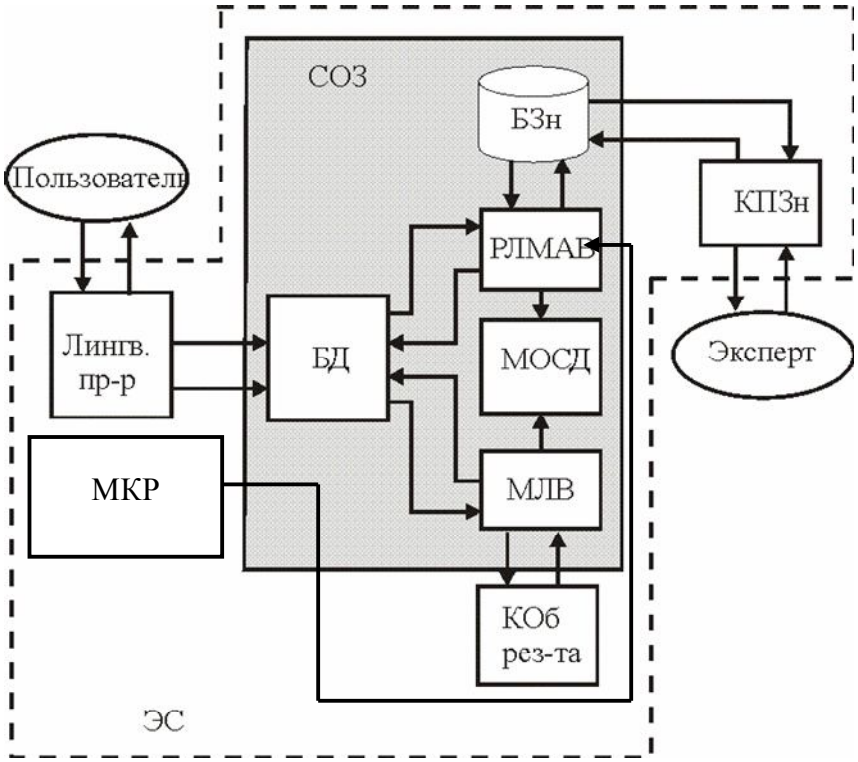


Рис.1. Структура интеллектуальной СППР для обработки данных в составе группы ИР

С точки зрения АСУ интеллектуальный робот [8] представляется совокупностью взаимосвязанных подсистем (ПС), имеющих локальные модули управления (ЛМУ) и ориентированных не только на обеспечение прецизионного управляемо-

го передвижения, позиционирования и выполнения программируемых работ, но и выполнение коммутационных обменов сообщениями и последующего автономного принятия решений о передвижении, выборе вида работы, ее длительности и др. (рис. 2).

Структурная схема ИР включает в свой состав:

а) подсистему управления движением;

б) подсистему управления ресурсами;

в) подсистему позиционирования и управления связью;

г) подсистему анализа и реконфигурации.

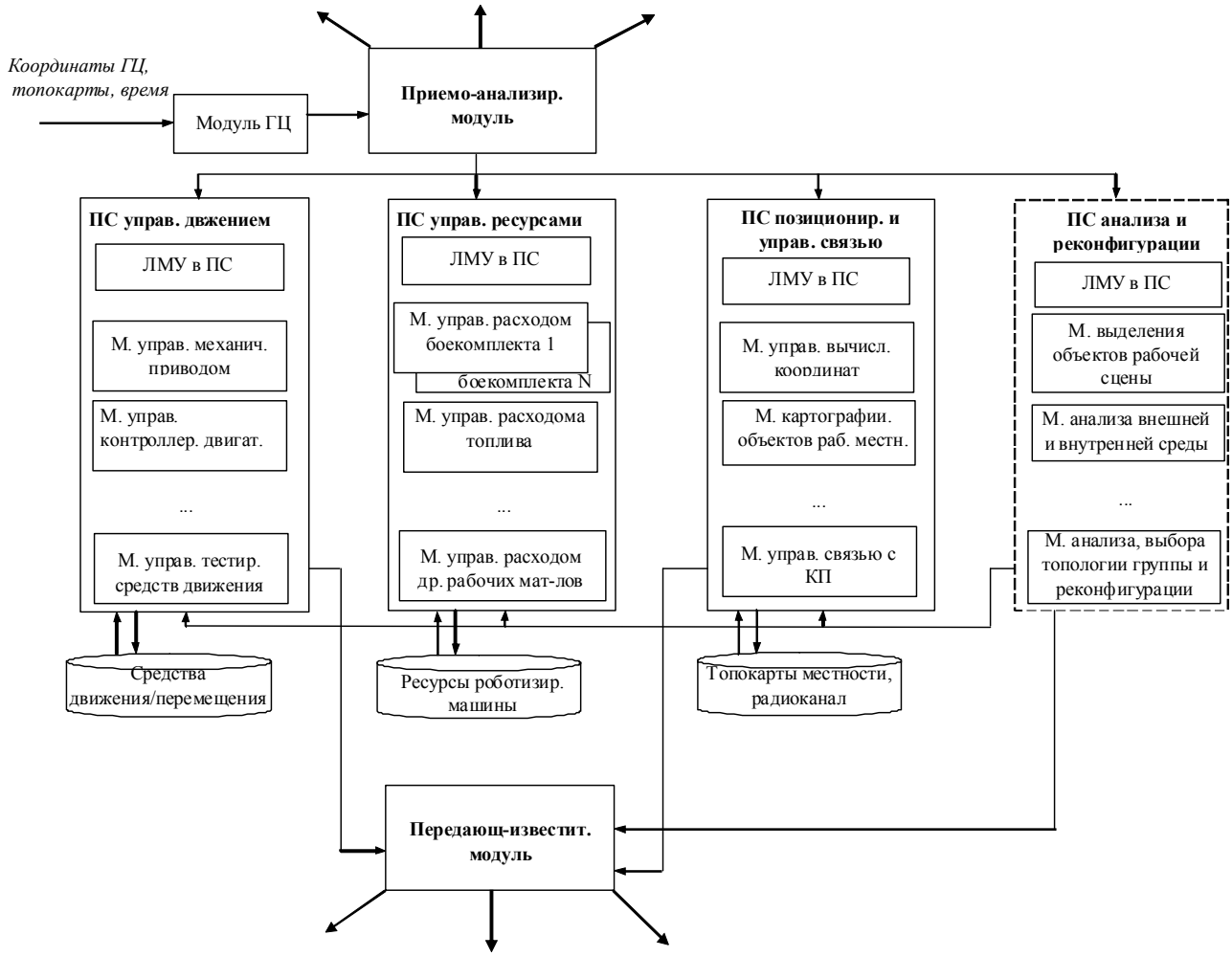


Рис. 2. Структурная схема интеллектуального робота

Первые три подсистемы имеют собственные локальные модули управления и преимущественно ориентированы на выполнение расчетно- логических действий детерминированного характера. Средства очувствления ИР в принятии решений данных подсистем ориентированы преимущественно на мехатронные функции движения и состоят в приеме и мониторинге внешней информации для предотвращения неконтролируемых перемещений и недопустимых движений.

Вопросы анализа внешнего окружения и соответствующей топологической расстановки ИР входят в функцию четвертой подсистемы, имеющей штриховой контур. Отличительная особенность подсистемы анализа и реконфигурации заключается в том, что решение о статусе робота через передающе-известительный модуль может быть оттранслировано в

соседние роботы в подсистему позиционирования и управления связью, что создает базу для динамического управления конфигурацией роботов (размещением) в составе группировки. Введение обособленной подсистемы анализа и реконфигурации позволяет получить распределенную по отдельным роботам СОЗ (см. рис. 1) и осуществлять оперативный поиск ближайшего рационального варианта перераспределения ресурса и выполнения работ по достижению цели. Фактически МЛВ (см. рис. 1) представляет собой модульный набор относительно коротких правил (продукций) оценки ситуации (вычисления риска недостижения цели и др.), связанный в единую сеть средствами связи с ближайшими роботами.

Декомпозиция решаемых мехатронных, расчетно-логических, навигационных, связных задач и работ, а также общие принципы мониторинга за группой роботов (единый центр выдачи заданий – МКПУ или СКПУ) позволила разработать структурную организацию информационно-механической компоненты ИР (см. рис. 2).

В составе информационно-управляющих подсистем (рис. 3) одно из центральных мест занимает бортовой вычислительный модуль взаимодействия (БВМВ), в функции которого входит координация работы внутренних подсистем и трансляция команд от внешнего источника управления.

Внешним источником управления могут выступать переносной пульт дистанционного управления (ППДУ), мобильный командный пункт управления (МКПУ) или стационарный командный пункт управления (СКПУ). Управление во всех перечисленных вариантах происходит посредством установленных и частично дублирующих друг друга радиоканалов, в том числе между коммутационными подсистемами роботов.

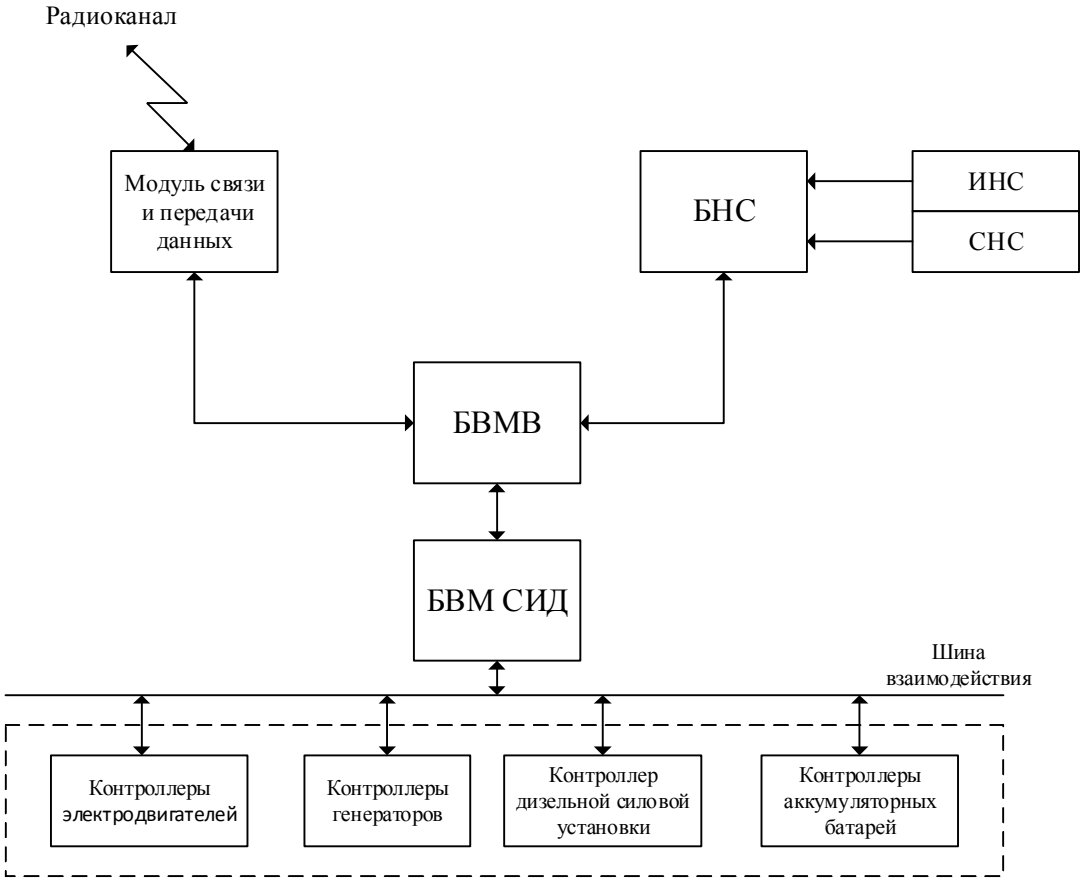


Рис. 3. Структурная организация информационно-механической компоненты ИР

Для реализации функций навигации ИР и занятия расчетных позиций используется бесплатформенная навигационная система (БНС), включающая подчиненные инерциальную и спутниковую навигационную системы (ИНС и СНС соответственно).

Обеспечение автоматического движения робота в соответствии с заданной картой перемещений (динамическая схема (пере)размещения) осуществляет бортовой вычислительный модуль системы интеллектуального движения (БВМ СИД) с применением программируемой элементной базы ПЛИС [9].

Следует учитывать, что представленная структурная схема не учитывает требования дублирования всех информационно-управляющих подсистем, которое необходимо для обеспечения безопасности использования интеллектуальных роботов, даже если предметная область использования разрабатываемых робототехнических комплексов не связана напрямую с военным использованием. Так как обеспечение безопасности самостоятельного передвижения интеллектуальных роботов является одной из главных задач при проектировании и разработке роботов, дублирование всех принципиально важных систем, несомненно, увеличивает сложность и продолжительность разработки интеллектуальных роботов, но это является необходимым требованием обеспечения безопасности функционирования интеллектуальных роботов.

Заключение

Разработана и детализирована структурная схема интеллектуального робота, в которой введена подсистема анализа и реконфигурации. Данная подсистема осуществляет совместно с локальными модулями управления выработку альтернативных вариантов для автономного принятия решений по изменению плана действия робота. Кроме того, детализирован состав бортового вычислительного модуля взаимодействия подсистем, в функции которого входит координация работы внутренних подсистем и трансляция команд от внешнего источника управления. Общая организация и функционал подсистем позволяют перейти к дальнейшей разработке модулей с рациональным распределением выполняемых функций, в том числе обоснованным дублированием жизнеобеспечивающих функций.

Список литературы

1. Ириков В.А., Тренев В.Н. Распределенные системы принятия решений. Теория и приложения. – М.: Наука; Физматлит, 1999. – 288с.

2. Продукционная машина-генератор для обработки символьных данных дискретных объектов / Е.А. Титенко [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. – №2-1. – С. 111-115.

3. Каляев И.А., Гайдук А.Р. Однородные нейроподобные структуры в системах выбора действий интеллектуальных роботов. – М.: Янус-К, 2000. – 280 с.

4. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.

5. Прядко Т.В., Емельянов С.Г. Структурно-функциональная организация подсистемы распознавания и оценки сложноструктурированных рисков // Известия Тульского государственного университета. Серия: Экономика. Управление. Стандартизация. Качество. – 2006. – Вып. 3. – С. 18-20.

6. Курочкин А.Г., Емельянов С.Г., Бородин М.В. Продукционная модель для координации бесконфликтного расположения группы автономных роботов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2015. – Т. 13, № 6. – С. 10-14.

7. Гривачев А.В., Емельянов С.Г., Бородин М.В. Структурно-функциональная схема распознавания и оценки риска в системе управления роботизированными многофункциональными машинами // Информационно-измеритель-ные и управляющие системы. – 2015. – Т. 13, № 6. – С. 4–9.

8. Управление интеллектуальными роботами с использованием продукционных систем / А.Г. Курочкин [и др.] // Интеллектуальные информационные системы: тенденции, проблемы, перспективы: матер. докл. II регион. науч.-техн. конф. «ИИС-2014» (10 ноября 2014 г.) – Курск, 2014. – С. 42-48.

9. Титов В.С., Коновальчиков А.П., Титенко Е.А. Высокопроизводительные вычислительные системы на основе ПЛИС // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – № 4 (43)-2. – С. 73-77.

Получено 10.06.15

P.V. Lotorev, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: pashik_email@mail.ru)

A.G. Kuruchkin, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: ak76@kursk.ru)

A.V. Grivachev, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: Garpun-22@mail.ru)

S.G. Emelyanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: rector@swsu.ru)

DESIGN OF DECISION SUPPORT SYSTEM FOR CONTROL OF GROUP OF ROBOTS

This article is show the structure of decision support systems for the management of a group of robots in conditions of active external environment. The basic novelty of the structure is to develop the selection of subsystems analysis and reconfiguration, as well the positioning subsystem performing dynamic reallocation of positions of robots.

***Key words**: data processing and knowledge, a production calculations, reconfiguration of group of robots.*

УДК 614.84:005.7

О.В. Ефремова, инженер, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск)
(e-mail: Twin22_olya@mail.ru)

И.С. Ефремов, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск)
(e-mail: Igor-lazio@mail.ru)

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА ЗАЩИТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

В статье рассмотрена система обеспечения пожарной безопасности объекта защиты, ее основные элементы, а также современные модели пожароопасных ситуаций управления объектом защиты. Установлено, что для реализации моделей целесообразно использование системы поддержки принятия управленческих решений для обеспечения пожарной безопасности объекта защиты, необходимых для локализации пожара в кратчайшие сроки и минимизации возможного ущерба здоровью людей. Построена схема структурно-функциональной организации системы поддержки принятия управленческих решений для обеспечения пожарной безопасности объекта защиты.

***Ключевые слова**: пожарная безопасность, системы обеспечения пожарной безопасности, модель пожароопасной ситуации, системы поддержки принятия управленческих решений, структурно-функциональная организация.*

***

Обеспечение пожарной безопасности – одна из ключевых задач, требующая решения для каждой организации. Пожар способен не только испортить оборудование и помещение, но и причинить вред здоровью сотрудников, поэтому данной проблеме уделяется особое внимание как руководителей организаций, так и производителей систем пожарной безопасности.

Целью создания системы обеспечения пожарной безопасности объекта защиты является предотвращение пожара, обеспечение безопасности людей и защита имущества при пожаре.

Все действия по обеспечению пожарной безопасности, предпринимаемые в организации, в том числе по выполнению требований пожарной безопасности, относятся к мерам противопожарной безопасности. На территории нашей страны действуют три основных нормативных документа, регулирующих деятельность по обеспечению противопожарной безопасности. Прежде всего к ним относится Федеральный закон «О пожарной безопасности», который регулирует права и обязанности граждан в области пожарной безопасности, а также устанавливает основные требования государства к системе обеспечения пожарной безопасности в жилых и административных зданиях и на промышленных предприятиях.

Системы противопожарной защиты должны обладать надежностью и устойчивостью к воздействию опасных факторов пожара в течение времени, необходимого для достижения целей обеспечения пожарной безопасности.

Основными элементами системы противопожарной защиты являются:

– система пожарной сигнализации;

– система пожаротушения;

– система оповещения и управления эвакуацией;

– системы автоматики и диспетчеризации.

Система пожарной сигнализации

Пожарная сигнализация – совокупность технических средств, предназначенных для обнаружения пожара, обработки, передачи в заданном виде извещения о пожаре, специальной информации и (или) выдачи команд на включение автоматических установок пожаротушения и включение исполнительных установок систем противодымной защиты, технологического и инженерного оборудования, а также других устройств противопожарной защиты.

Пожарная сигнализация может также совмещать в себе и охранные функции, которые позволят при ограниченном бюджете оградить объект от несанкционированного доступа.

Наиболее эффективно с задачей своевременного обнаружения пожара и оповещения персонала о задымлении или возгорании справляются адресно-аналоговые системы. Благодаря встроенным аналитическим алгоритмам эти системы раньше других фиксируют угрожающую ситуацию, а адресуемость каждого устройства позволяет точно локализовать «место» предполагаемого возгорания. В настоящее время все еще находят свое применение адресные системы пожарной сигнализации и традиционные системы неадресного типа. Такие системы используют пороговый принцип принятия решения о пожаре и являются менее эффективными и не столь надежными в эксплуатации [6].

Оптимальный выбор оборудования пожарной сигнализации определяется, как правило, характеристиками здания, такими как площадь защищаемой территории, назначение объекта, требования к интеграции систем безопасности, уровень автоматизации инженерных систем объекта и т.д.

Построение систем пожарной сигнализации сводится к оборудованию помещений здания детекторами (датчиками) различного типа в соответствии с реализуемыми способами обнаружения факторов пожара и объединению их в шлейфы сигнализации. Станция ПС программируется на автоматическое управление системами пожаротушения, на оповещение

людей о пожаре и о путях возможной эвакуации, на управление системой дымоудаления и на включение/отключение других инженерных систем здания.

Наиболее распространенными типами датчиков (извещателей) являются: дымовые (реагируют на возникновение дыма), тепловые (реагируют на повышение температуры), ручные (подача сигнала тревоги осуществляется вручную), пламени (реагируют на открытый огонь) и др. Эффективность тех или иных датчиков зависит от конкретного объекта – необходимые средства пожарной безопасности выбираются сугубо индивидуально.

В наиболее общем виде можно сформулировать критерии для оценки эффективности пожарной сигнализации:

– функциональные показатели;

– показатели надежности;

– удельные затраты на стадии монтажно-наладочных работ;

– удельные эксплуатационные затраты.

Чаще всего система пожарной безопасности интегрируется с другими системами объекта – охранной, доступа, видеонаблюдения, электропитания и т.д. Таким образом, появляется возможность управления всеми используемыми системами с одного диспетчерского пункта, что не только позволяет снизить расходы на содержание персонала, но и очень удобно.

Система пожаротушения

Пожарная обстановка на объекте определяется в основном концентрацией находящихся на нем горючих материалов, их составом, наличием естественной или искусственной вентиляции, а также источниками возгорания (пожара).

Системы автоматического пожаротушения являются неотъемлемой частью комплексных систем безопасности. Они предназначены для обнаружения возгорания, подачи огнетушащего средства к очагу возгорания и сигнала о возгорании в систему оповещения.

Системы автоматического пожаротушения подразделяются в зависимости от типа применяемого огнетушащего средства на:

– системы водяного пожаротушения;

– системы газового пожаротушения;

– системы порошкового пожаротушения;

– системы аэрозольного пожаротушения;

– системы пенного пожаротушения.

В большинстве организаций, общественных заданиях используется первый тип систем.

Пожаротушение водой или пеной весьма эффективно, недорого и доступно. Однако оно имеет существенный недостаток – вода сама по себе способна причинить материальный ущерб организации, выводя из строя оборудование или затопляя важную документацию.

Система оповещения и управления эвакуацией

При возникновении чрезвычайной ситуации, связанной с угрозой здоровью и жизни людей, важно своевременно оповестить находящихся в опасной зоне людей и обозначить пути эвакуации.

Система оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ) — обязательная часть системы безопасности любого объекта, представляющая собой совокупность технических устройств, предназначенных для своевременного сообщения людям о чрезвычайной ситуации и организации и управления процессом их безопасной эвакуации [5]. Наличие такой системы регламентировано государственными нормативными документами, степень автоматизации системы зависит от категории зданий. Уровень современных технологий позволяет организовать СОУЭ любой сложности, начиная от простейших систем звукового оповещения и заканчивая многофункциональными решениями, включающими звуковое, речевое, световое оповещение с возможностью реализации различных алгоритмов

эвакуации, управления процессом оповещения из нескольких точек зданий. Второстепенной, но повсеместно востребованной функцией систем речевого оповещения является использование последней для трансляции внутри объекта фоновых музыкальных программ, а также служебной информации различного назначения и содержания.

Структура любой СОУЭ сводится к двум основным элементам: центральное оборудование и распределительная сеть оповещения.

Системы автоматики и диспетчеризации

В современном здании функционируют десятки различных инженерных систем, и системы автоматики и диспетчеризации предназначены обеспечить эффективность функционирования этих систем.

В последнее время получила широкое распространение интеграция инженерных систем здания с системами пожарной, охранной сигнализации, системами контроля доступа. Данная интеграция обычно выполняется с использованием OPC-технологий.

Систему автоматизации и диспетчеризации традиционно разделяют на 3 уровня:

– периферийное оборудование;

– полевые контроллеры;

– систему верхнего уровня.

Периферийное оборудование – это различного рода датчики (давления воды, температуры воды, температуры воздуха и т.д.), запорно-регулирующая аппаратура, приводы, клапаны.

Контроллеры – это центральная часть систем автоматизации и диспетчеризации. Конструктивно они могут иметь распределенную структуру модулей ввода-вывода, а могут быть представлены единым блоком. Контроллеры обычно устанавливаются либо в шкаф автоматики, либо в комбинированный шкаф, включающий как электрическую часть, так и автоматику.

Системы верхнего уровня позволяют обслуживающему персоналу и пользователям отслеживать состояние системы, оперативно реагировать на аварийные и предаварийные ситуации, сохранять параметры технологических процессов и протоколировать действия операторов для дальнейшего анализа.

Современные системы верхнего уровня дают возможность:

– создания графических экранов, мнемосхем, систем меню и окон для отображения технологической информации;

– архивации данных, переданных технологическим оборудованием или сформированных в процессе обработки;

– архивации событий, сигналов АПС, а также составление отчетов;

– защиты от несанкционированного доступа;

– регистрации запусков системы и других действий оператора (ведение системного журнала);

– использования мощной подсистемы статистической обработки;

– наличия базы данных реального времени, размещаемой в оперативной памяти, где находятся все системные и определяемые пользователем переменные, связываемые с технологическими данными и с отображаемыми на экраны объектами;

– построения распределенной иерархической системы, в которой сервер занимается сбором и хранением информации, а рабочие станции позволяют операторам осуществлять взаимодействие с технологическим оборудованием независимо друг от друга.

Применение автоматики и диспетчеризации в инфраструктуре здания позволяет контролировать состояние отдельных систем, протоколировать параметры их работы, снижать энерго- и теплозатраты, износ оборудования, своевременно реагировать на внештатные ситуации.

В настоящее время благодаря многочисленным исследованиям получены подробные сведения о поведении техно-

генного пожара. При достаточно точном знании множества параметров, от которых зависит развитие и распространение пожара, практически любая из классических моделей может описывать и оценивать пожар [1]. Активно ведутся разработки в части адаптации известной теории людских потоков к вопросам совместной эвакуации людей различных групп мобильности, существуют соответствующие компьютерные моделирующие программы.

Есть три основные расчетные модели движения людского потока:

– аналитическая модель;

– индивидуально-поточная;

– имитационно-стохастическая.

Время эвакуации из здания или помещения складывается из суммы времени прохождения человеком каждого из участков по пути движения. Первая модель является наиболее простой и менее трудоемкой по сравнению с двумя другими. Однако точность результата расчета зависит от полноты проработанности участков движения и правильности выбора диктующих маршрутов эвакуации. Две другие модели являются более точными, однако без применения специальных автоматизированных программных средств нахождение конечного результата является достаточно трудоемким [2].

В связи с возникновением пожароопасных ситуаций уровень пожарной безопасности напрямую зависит от принятия оперативных управленческих решений, необходимых для локализации пожара в кратчайшие сроки и минимизации возможного ущерба здоровью людей. Управление объектом защиты в условиях пожароопасной ситуации возможно только на основе построения адекватных моделей, комплексно учитывающих структурные, статистические, качественные свойства пожарных рисков [5].

Современные модели пожароопасных ситуаций управления объектом защиты однозначно свидетельствует о том, что и вероятностные, и индексные методы и модели являются весьма мощными инструментами. Вероятностные методы требуют проведения весьма трудоемкого и детального анализа с привлечением соответствующего математического аппарата и программных средств. Их применение для расчета пожарного риска в зданиях представляет значительные трудности из-за необходимости проводить расчеты развития пожара и эвакуации людей на основе дифференциальных моделей для многих сценариев. Индексные методы, реализующие эвристический подход, наоборот, позволяют оценивать уровень пожарной опасности с минимальными вычислительными затратами, однако успешность их использования кардинальным образом зависит от правильности балльной оценки различных факторов и интерпретации результата. Для максимально эффективного использования различных методов необходимо четко представлять их область применимости, а также сильные и слабые стороны.

Для решения конкретных проблем управления объектом защиты в условиях пожароопасных ситуаций применяется нечеткая логика [3]. Необходимость ее использования обусловлена обработкой большого количества данных, содержащих в себе как четкие, так и нечеткие параметры, а исходя из вышеизложенного, современные средства обработки недостаточно развиты.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения математического аппарата теории нечетких множеств к моделированию пожароопасной ситуации.

Для реализации модели целесообразно использование системы поддержки принятия управленческих решений для обеспечения пожарной безопасности объекта защиты [4].

Схема структурно-функциональной организации системы поддержки принятия управленческих решений для обеспечения пожарной безопасности объекта защиты представлена на рисунке.

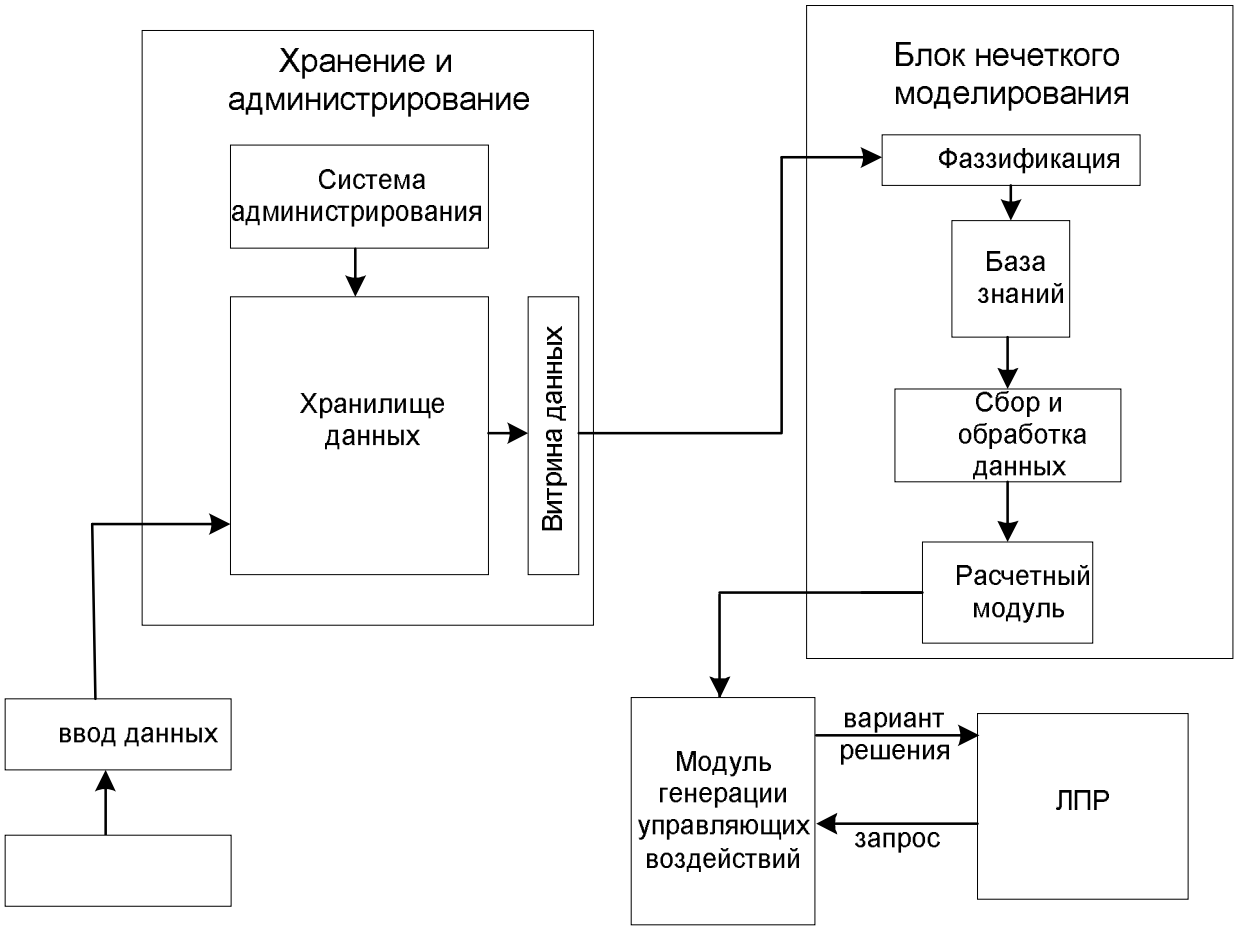


Рис. Схема структурно-функциональной организации СППУР для обеспечения пожарной безопасности объекта защиты

Структурно-функциональная организация СППУР состоит из:

• **двух блоков**: блока хранения и администрирования, предназначенного для хранения данных и передачи их на анализ; блока нечеткого моделирования, предназначенного для оценки пожароопасной ситуации;

• **модуля** генерации управляющих воздействий, осуществляющего выработку альтернатив для лица, принимающего решение.

Рассмотрим составляющие СППУР подробнее.

1. Блок хранения и администрирования включает следующие модули:

– система администрирования. Осуществляет обеспечение установленных регламентов доступа к данным;

– хранилище данных. Содержит в себе полный комплекс данных об объекте защиты, структурированный в соответствии с тематической направленностью и установленными форматами представления;

– витрина данных. Виртуальная база данных или результат запроса к данным, предоставляющий пользователю для работы лишь часть хранилища данных. Необходима для оптимизации информационной нагрузки и соблюдения установленных регламентов доступа к данным.

2. Блок нечеткого моделирования реализует модель и состоит из следующих модулей:

– модуль фаззификации. Осуществляет переход к лингвистическим переменным, задание лингвистических переменных и функций принадлежности;

– база знаний содержит базу нечетких правил, определяющих зависимость целевой функции от комбинаций значений.

3. Модуль генерации управляющих воздействий. Осуществляет генерирование управляющих альтернатив для лица,

принимающего решение (ЛПР), на основе результатов моделирования.

Таким образом, построена структурно-функциональная организация СППУР для обеспечения пожарной безопасности объекта защиты, где лицо, принимающее решение, осуществляет оперативное управление всеми средствами объекта защиты, имея непосредственный доступ к полному комплексу данных об объекте защиты, необходимых для локализации пожара в кратчайшие сроки, и минимизации возможного ущерба здоровью людей.

Список литературы

1. Ефремова О.В., Ефремов И.С. Математическая модель оценки срочности тушения техногенных пожаров в лечебно-профилактических учреждениях // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – URL: www.science-education.ru/119-15189.

2. Проблемы управления эвакуацией пациентов в системе противопожарной безопасности ЛПУ / О.В. Ефремова, С.Ю. Сазонов, И.С. Ефремов, И.В. Зотов // Современные наукоемкие технологии: материалы VI Международной студенческой электронной научной конференции «Студенческий научный форум 2014»: «Академия Естествознания». – 2014. – №5-1. – С. 32–33.

3. Подход к оценке рисков природных и техногенных катастроф с использованием аппарата нечеткой логики / И.В. Зотов, С.Ю. Сазонов, О.В. Ефремова, С.А. Аббакумов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – №6(45). – С. 40–45.

4. Оценка рисков природных и техногенных катастроф в информационно-аналитических системах поддержки принятия решений / И.В. Зотов, С.Ю. Сазонов, О.В. Ефремова, С.А. Аббакумов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – №5(44)-2. – С. 19–24.

5. Формализованный подход к оценке времени эвакуации пациентов в лечебно-профилактических учреждениях / О.В. Ефремова, И.С. Ефремов, И.В. Зотов, С.Ю. Сазонов, А. Кучеров // Интеллектуальные информационные системы: тенденции, проблемы, перспективы: сборник материалов II региональной заочной научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2014. – С. 50–53.

6. Структурно-функциональная организация подсистемы оценки рисков природных и техногенных катастроф на основе нечеткой логики / О.В. Ефремова, И.С. Ефремов, И.В. Зотов, С.Ю. Сазонов // Интеллектуальные информационные системы: тенденции, проблемы, перспективы: сборник материалов региональной заочной научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2013. – С. 45–49.

Получено 19.06.15

O.V. Efremova, Engineer, Southwest State University (Kursk) (e-mail: Twin22_olya@mail.ru)

I.S. Efremov, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: Igor-lazio@mail.ru)

SYSTEM OF ENSURING FIRE SAFETY OF OBJECT OF PROTECTION WITH APPLICATION OF SYSTEM OF SUPPORT OF ADOPTION OF ADMINISTRATIVE DECISIONS

In article system of ensuring fire safety of object of protection, their basic elements, and also modern models of fire-dangerous situations of management of object of protection are considered. It is established that for realization of models expediently use of system of support of adoption of administrative decisions for ensuring fire safety of object of protection, necessary for localization of the fire in the shortest possible time, and minimization of possible damage to human health. The scheme of the structurally functional organization of system of support of adoption of administrative decisions for ensuring fire safety of object of protection is constructed.

***Key words**: fire safety, systems of ensuring fire safety, model of a fire-dangerous situation, system of support of adoption of administrative decisions, structurally functional organization.*

УДК 621.535.04

Д.С. Гришин, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: grish1nds@yandex.ru)

Е.А. Титенко, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: johntit@mail.ru)

Н.А. Милостная, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: nat_mil@mail.ru)

М.А. Шевченко, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: shevamax@mail.ru)

В.А. Ханис, студент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: khanis@mail.ru)

АЛГОРИТМ ПОИСКА ПОДСТРОКИ НА ОСНОВЕ ПОЗИЦИОННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТЕКСТА ДЛЯ АРХИВНО-ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ

В работе представлен алгоритм поиска подстроки на основе позиционного представления теста для архивно-текстовых данных, а также проведено сравнение разработанного алгоритма с самым быстрым из известных алгоритмов, используемых при решении данной задачи.

***Ключевые слова**: поиск подстроки, архивные данные, обработка символьной информации.*

***

Развитие современной теоретической и прикладной информатики связывается со значительным числом государственных и коммерческих научных проектов по автоматизации истинно человеческих функций. Интеллектуализация процессов обучения, распознавания, принятия решений расширяет возможности человека по взаимодействию с окружающим миром. Методы и алгоритмы поиска данных играют существенное значение в формализации интеллектуальных процессов. Несмотря на то, что поисковые средства (модели, методы, алгоритмы, специализированные устройства) достаточно изучены, систематическое увеличение объемов информации (удвоение каждые полтора года [1]), особенно текстовой информации, накапливаемой в архивах или автоматизированных архивных хранилищах, определяет востребованность исследования.

Как известно, символьные данные являются основной формой обмена информацией и знаниями [2]. Среди всей символьной информации выделяются статичные данные, то есть данные, которые не предназначены для оперативных изменений. Среди них могут быть различного рода базы данных, архивы, словари, документы, статьи, книги и т.д. В них устойчивой характеристикой являются фиксированные позиции символов. Тем не менее большинство современных алгоритмов поиска основано на использовании комбинаторных и синтаксических свойств строк. Такие методы и алгоритмы осуществляют предварительную обработку подстроки для последующего направленного поиска.

Для статичных данных целесообразно использовать методы и алгоритмы на основе индексации текста, построения деревьев или автоматов. Таких алгоритмов достаточно мало, и на их изучение уделяется гораздо меньше времени. Также стоит отметить поисково-переборный характер большинства алгоритмов поиска. В связи с этим в процессе поиска возникают ситуации так называемого «холостого» срабатывания. Это означает, что часть символов подстроки совпала с текстом, а следующий символ – нет, поэтому выполняется отступ в пространстве поиска подстроки. Такие «холостые» сравнения, как правило, занимают большую часть времени при поиске вхождений подстроки в исходную строку и для архивно-текстовых данных составляют исследуемое противоречие.

Таким образом, разработка алгоритма поиска для архивно-текстовых данных

на основе позиционной предобработки подстроки является актуальной научно-технической задачей.

Сущность предлагаемого подхода

Сущность предлагаемого подхода заключается в получении дополнительной количественной информации о характеристиках отдельных символов подстроки и ее использовании для организации направленного поиска.

Для того чтобы уменьшить количество «холостых» сравнений, в данной статье предлагается использовать дополнительную структуру, которая позволит искать подстроку P в местах в тексте T, в котором присутствует хотя бы один символ подстроки. Дополнительной структурой будет позиционное представление.

Позиционное представление PRS[0…|T| - 1] текста представляет собой K = |A| последовательностей, где A – алфавит.

Каждая такая последовательность определяется как $PRS[a] = N_a$, где $a \in A$, N_a – упорядоченный набор индексов символа a в T. Тем не менее процесс поиска будет производиться на обычном представлении текста, в котором текст представляется как массив символов.

Основной предпосылкой к использованию позиционного представления является то, что это представление позволяет получить список вхождений любого символа подстроки в текст, что означает, что можно искать вхождения только в тех местах текста, где этот символ присутствует. Также позиционное представление дает возможность сравнивать символы подстроки с соответствующими символами текста в порядке возрастания количества символов подстроки в тексте. Такой порядок позволяет обнаруживать несоответствие раньше, чем при последовательном сравнении символов слева направо, а также уменьшает количество индексов, с которых начинается сравнение.

Для хранения позиционного представления будет использоваться массив списков, где размер массива равен размеру алфавита, а списки в каждой ячейке массива предназначены для хранения упорядоченных индексов символа, двоичный код которого равен индексу ячейки массива (элемента строки).

Наглядно описанная структура для строки «abaccabdaefabccdbabdc» в алфавите A = {a, b, c, d, e, f} представлена на рис. 1.

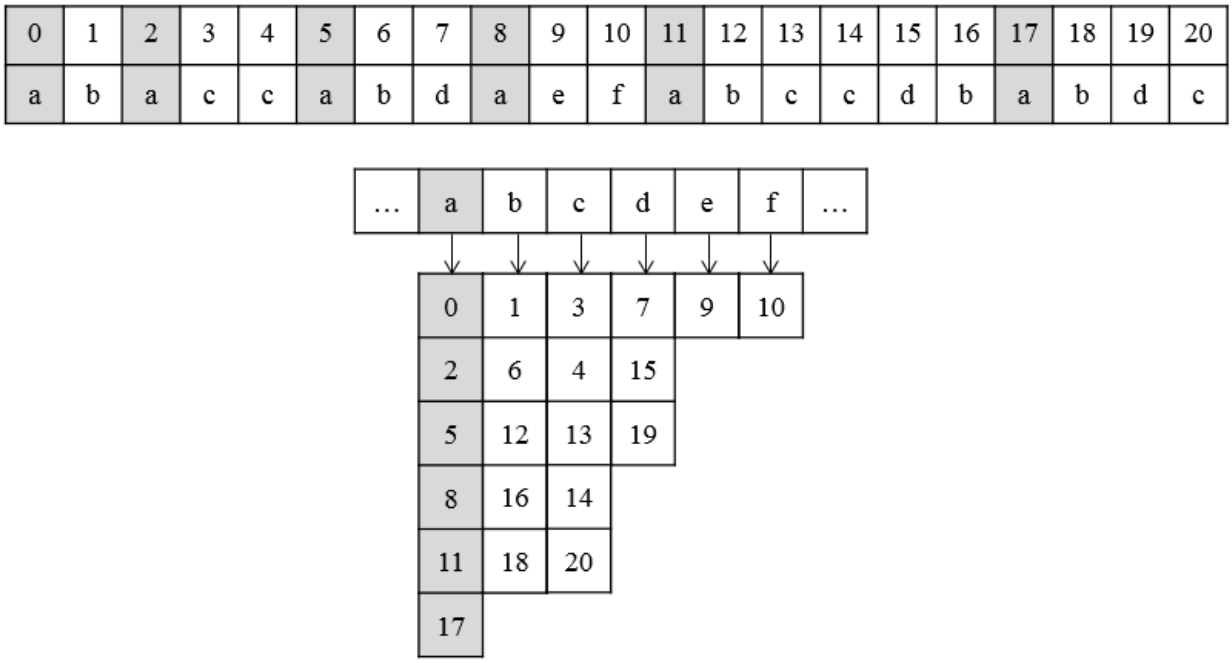


Рис. 1. Позиционное представление для строки «abaccabdaefabccdbabdc»

Описанный алгоритм можно представить в виде четырех шагов:

1. Построение позиционного представления.

2. Получение массива с индексами символов подстроки, которые отсортированы в порядке возрастания символов по данным индексам в тексте.

3. Получение индексов, с которых будет начинаться сравнение для каждого возможного вхождения.

4. Поиск подстроки в тексте в полученных на шаге 3 индексах и с полученным на шаге 2 порядком сравнения.

Модули алгоритма

Для построения позиционного представления необходимо создать пустой массив списков размером |A|. Далее для каждого символа текста необходимо добавить его индекс в список массива по индексу, равному двоичному представлению текущего символа.

Псевдокод алгоритма построения позиционного представления имеет следующий вид:

```
GetPRS(T)
   PRS = new array[|A|]
   for (i = 0; i < |T|; i++)
      PRS[T[i]].Add(i);
   return PRS;
```

При поиске данным алгоритмом потребуется массив, в котором содержатся индексы символов подстроки в порядке возрастания этих символов в тексте. Также этот массив будет использоваться для получения «базового» списка B, содержащего все индексы одного из символов подстроки, который реже остальных встречается в тексте.

Для получения этого массива необходимо сначала создать два массива размером, равным |P|. Первый массив O, в который записываются индексы символов подстроки, а во второй C – количество этих символов в тексте. Далее необходимо произвести сортировку массива C, в процессе которой при преставлении элементов этого массива должны переставляться соответствующие по индексу элементы массива O. После такой сортировки массив O будет содержать индексы подстроки в порядке возрастания символов по данным индексам в тексте.

Псевдокод функции, определяющей порядок индексов, по которому будут производиться сравнения символов подстроки с соответствующими символами текста:

```
GetOrder(P, PRS)
   O = new array[|P|];
   C = new array[|P|];
   for (i = 0; i < |P|; i++)
      O[i] = i;
   for (i = 0; i < |P|; i++)
      C[i] = |PRS[P[i]]|;
   O = Sort(C, O);
   return O;
```

Функция поиска начинается с проверки длины подстроки. Если длина подстроки равна 1, тогда можно сразу получить список всех вхождений этой подстроки в текст, в противном случае необходима проверка.

Проверка начинается с получения массива O, то есть очередности сравнения символов подстроки с символами текста, затем на его основе вычисляется «базовый» список B. После этого происходит процесс проверки «возможных» индексов вхождений, которые равны элементам списка B, уменьшенным на O[0]. Так же следует учесть, что индексы B не могут быть меньше O[0] и больше |T| - (|P| - O[0]), потому что вхождение, рассчитанное на основании этих элементов, будет меньше 0 или больше |T| - |P|, чего быть не может. Поэтому если такие элементы встречаются, их можно пропустить.

Псевдокод функции поиска:

```
Search(P)
   if (|P| == 1)
      return PRS[P[0]];
   else
      result = new array[];
      O = GetOrder(P);
      B = PRS[P[O[0]]];
      for (i = 0; i < |B|; i++)
         if (B[i] > |T| - (|P| - O[0]) or B[i] < O[0])
            continue;
         for (j = 1; j < |P|; j++)
            if (T[B[i] + O[j] - O[0]] != P[O[j]])
               break;
            if (j == |P| - 1)
               result.Add(B[i] - O[0]);
      return result;
```

Тестирование

Проведем тестирование разработанного алгоритма. Для этого сравним время предварительной обработки текста, а также время поиска разработанного алгоритма с временем предварительной обработки текста и временем поиска таких алгоритмов, как:

– алгоритм Бойера-Мура;

– алгоритм поиска по суффиксному дереву.

Алгоритм Бойера-Мура был выбран как самый оптимальный в большинстве случаев, когда нет возможности провести предварительную обработку текста, а алгоритм поиска по суффиксному дереву был выбран потому, что является одним из самых известных и быстрых алгоритмов, которые предобрабатывают текст перед поиском подстроки [3]. Построение суффиксного дерева будет осуществляться алгоритмом Эско Укконена.

В качестве данных, используемых при тестировании, будем использовать данные, генерируемые случайно, на основании таких характеристик:

– размер алфавита: от 2 до 30 с шагом, равным 1 (28 итераций);

– размер текста: от 50 до 500000 с шагом, равным 5050 (99 итераций);

– размер подстроки: от 1 до 20 с шагом, равным 1 (19 итераций).

Результаты тестирования приведены на рисунках 2 и 3.

В ходе аппроксимации результатов методом наименьших квадратов были получены уравнения для поиска в суффиксном дереве, поиска алгоритмом Бойера-Мура и поиска в разработанном алгоритме соответственно:

$$y_1 = 9E-13x^2 + 2E-06x; \quad (1)$$

$$y_2 = 4E-15x^2 + 2E-06x; \quad (2)$$

$$y_3 = 9E-07x. \quad (3)$$

Из уравнений следует, что время поиска у алгоритма, основанного на позиционном представлении, растет медленней. По результатам данного теста можно установить, что разработанный алгоритм в среднем превосходит поиск всех индексов вхождений в суффиксном дереве по времени примерно в 3 раза и в 1,7 раза превосходит алгоритм Бойера-Мура.

Для графика зависимости времени предобработки текста от его размера также была проведена аппроксимация методом наименьших квадратов. Было получено соответственно уравнение для построения суффиксного дерева и уравнение для построения позиционного представления:

$$y_1 = 6E-10x^2 + 0,0018x, \quad (4)$$

$$y_2 = 1E-11x^2 + 4E-05x. \quad (5)$$

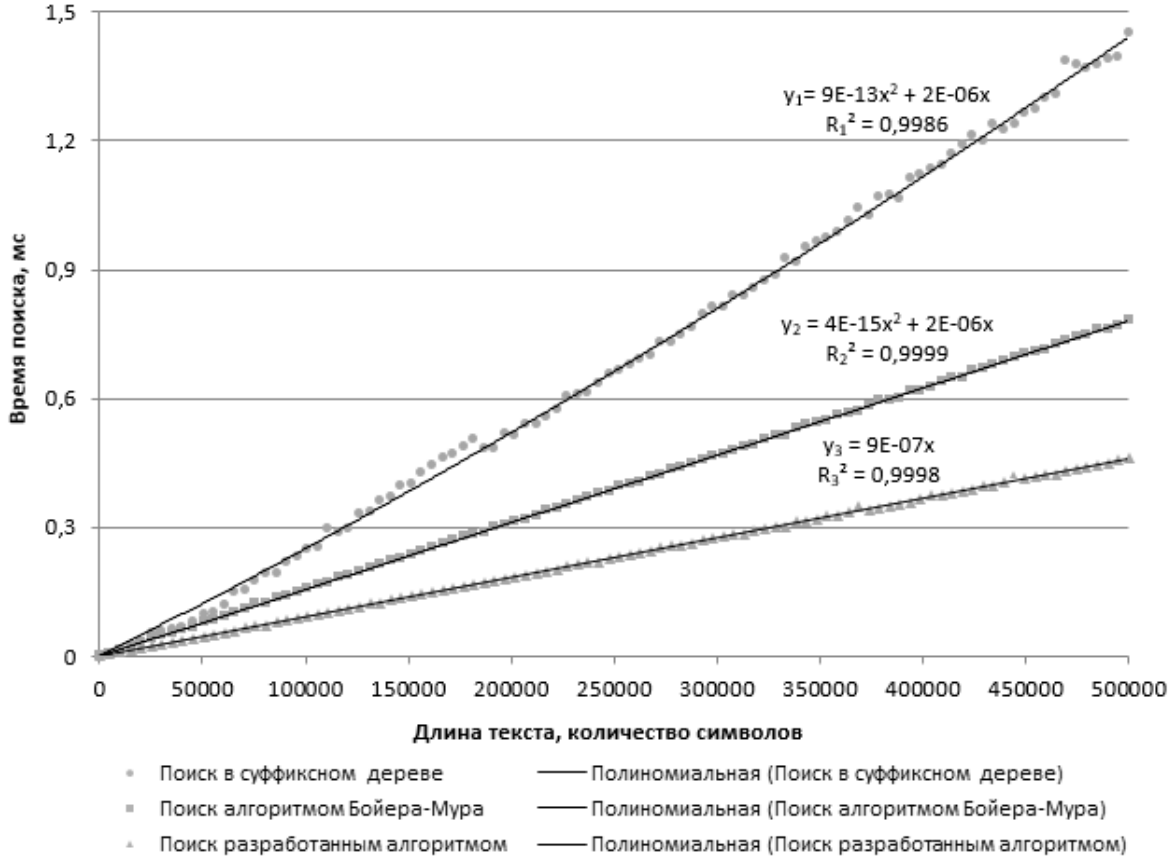


Рис. 2. График зависимости времени поиска от размера входного текста

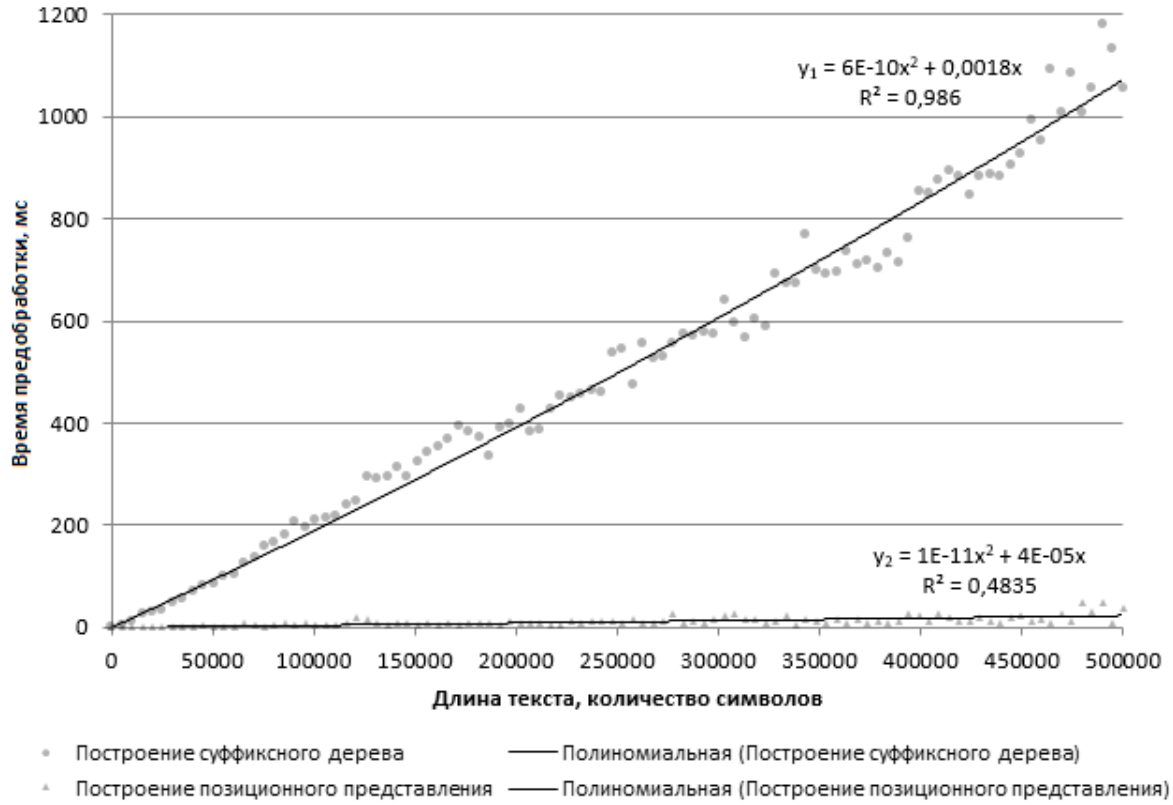


Рис. 3. График зависимости времени предобработки входного текста от его размера

По времени построения структуры для поиска построение позиционного представления превосходит построение суффиксного дерева примерно в 45 раз.

Заключение

Сравнение на операции поиска всех вхождений подстроки в текст в статичных данных показало, что алгоритм Бойера-Мура проигрывает в скорости поиска разработанному алгоритму, так как он хоть и имеет механизмы уменьшения «холостых» сравнений, но они довольно слабые, потому что не учитывают особенности текста. Поиск в суффиксном дереве тратит очень много времени при обходе поддерева в поиске листьев, которые содержат индекс вхождения, если было установлено, что подстрока входит в текст. Особенно эта ситуация проявляется, когда подстрока входит в текст много раз. Также к недостаткам известных алгоритмов можно отнести получение неотсортированного списка с индексами вхождений, сложность распараллеливания и т.д. При этом время построения суффиксного дерева гораздо превышает время построения позиционного представления.

Список литературы

1. Phabhakar Gupta, Vineet Agarwal, Manish Varshney. Design and Analysis of algorithms // Eastern Economy Editions. – 2010. – 313 с.

2. Титенко Е.А., Тутов Е.Б. Модифицированный алгоритм поиска с итерационным заглублением на графовых структурах // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 3(36). – С. 82–89.

3. Гасфилд Дэн. Строки, деревья и последовательности в алгоритмах // Информатика и вычислительная биология. – 2-е изд. – СПб.: Невский Диалект, 2003. – 654 с.

Получено 15.06.15

D.S. Grishin, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: grish1nds@yandex.ru)

E.A. Titenko, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: johntit@mail.ru)

N.A. Milostnaya, Candidate of Engineering Sciences, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: nat_mil@mail.ru)

M.A. Shevchenko, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: shevamax@mail.ru)

V.A. Khanis, Student, Southwest State University (Kursk) (e-mail: shanis@mail.ru)

STRING MATCHING ALGORITHM BASED ON POSITIONAL REPRESENTATION OF TEXT FOR ARCHIVAL-TEXT DATA

The paper presents string matching algorithm based on positional representation of text for archival-text data and a comparison of the algorithm with the fastest of known algorithms used in solving this problem.

***Key words**: string matching algorithm, archival data, processing of symbolic information.*

УДК 621.391.827.4

В.Г. Довбня, д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: vit_georg@mail.ru)

А.Е. Севрюков, ст. преподаватель, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: alsevryukov@yandex.ru)

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМА СИГНАЛОВ С КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

Разработана аналитическая модель и получены графические зависимости, позволяющие оценить влияние нелинейных искажений на помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией.

***Ключевые слова**: нелинейные искажения, динамический диапазон, помехоустойчивость, квадратурная амплитудная манипуляция.*

***

Нелинейные искажения являются одним из основных факторов, в значительной степени ограничивающих возможность обеспечения требуемой помехоустойчивости современных цифровых систем передачи информации (ЦСПИ). Наиболее критичными к этому виду искажений являются системы, использующие сигналы с квадратурной амплитудной манипуляцией (КАМ), поскольку амплитуды их квадратурных составляющих представляют собой сигналы с многоуровневой амплитудной манипуляцией.

В [1] разработана аналитическая модель и проведено исследование влияния уровня нелинейных (компрессионных) искажений на помехоустойчивость приема сигналов КАМ (в частности, КАМ-4, КАМ-16, КАМ-64). Особенностью предлагаемой аналитической модели является то, что компрессионным искажениям подвергаются не только амплитуды квадратурных составляющих сигнала, но и пороги принятия решения, что в подавляющем большинстве случаев не находит практического применения. Кроме того, значительное возрастание объема вычислительных затрат с ростом позиционности сигналов КАМ существенно ограничивают возможности применения разработанной аналитической модели.

В связи с этим актуальным является разработка аналитической модели, лишенной указанных недостатков и позволяющей оценить влияние нелинейных искажений на помехоустойчивость приема сигналов КАМ более высокой позиционности.

Компрессионные искажения обусловлены нелинейностью амплитудной характеристики, прежде всего, в области больших значений мощности входного сигнала. На рисунке 1 приведен типовой вид амплитудной характеристики линейного тракта. Динамический диапазон по уровню компрессии минус 1 дБ $Db_{-1\,дБ} = P_{вх.-1дБ} - P_{вх.min}$ для представленной на рисунке 1 амплитудной характеристики составляет 40 дБ. Штриховой линией обозначена идеализованная характеристика; сплошной – реальная характеристика, имеющая отклонение от линейной зависимости в области малых $(P_{вх.} \le P_{вх.min})$ и больших $(P_{вх.} \ge P_{вх.max})$ значений мощности входного сигнала. Отклонение амплитудной характеристики от линейной в области больших значений мощности приводит к появлению компрессионных искажений реализаций сигнала, пиковая мощность которых попадает в указанную область. Как правило, при значениях пиковой мощности ниже верхней границы динамического диапазона на 10 дБ $(P_{вх.max} = P_{вх.-1\,дБ} - 10дБ)$, уровень компрессионных искажений снижается настолько, что ими можно пренебречь.

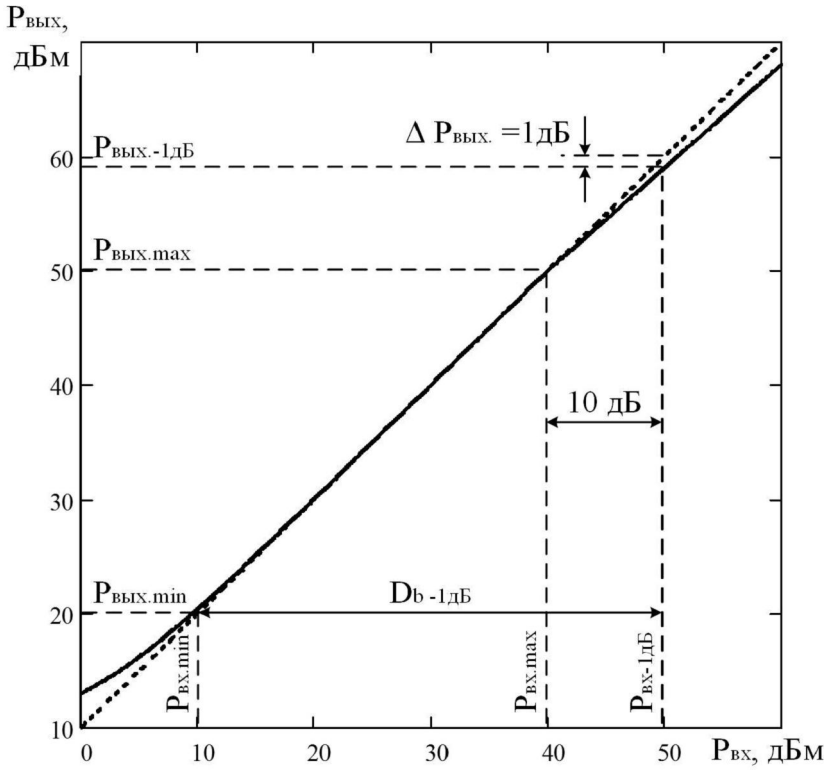


Рис. 1. Типовая форма амплитудной характеристики линейного тракта

Для оценки влияния нелинейных искажений на помехоустойчивость приема сигналов КАМ воспользуемся подходом, изложенным в [2], и найдем зависимость вероятности битовой ошибки от степени нелинейности амплитудной характеристики. При этом степень нелинейности амплитудной характеристики будем оценивать по коэффициенту сжатия – относительному изменению коэффициента передачи линейного тракта под влиянием основного сигнала [3].

Известно [4], что при взаимной независимости и равенстве априорных вероятностей передаваемых символов минимум средней вероятности ошибок в канале с аддитивным белым гауссовым шумом обеспечивает прием, осуществляемый в соответствии с правилом следующего вида:

$$\int_0^T u_T(t)s_i(t)dt - \frac{\mu_0}{2}E_i > \int_0^T u_T(t)s_j(t)dt - \frac{\mu_0}{2}E_j, \quad i \neq j, \tag{1}$$

где T – длительность реализации сигнала (символа);

$u_T(t) = \mu_i s_i(t-\tau, \phi) + \xi_T(t)$ – принимаемая с аддитивной помехой реализация сигнала КАМ;

τ, φ – время запаздывания и начальная фаза принимаемого сигнала соответственно;

μ_0 – номинальное значение коэффициента передачи линейного тракта;

μ_i – коэффициент передачи линейного тракта при приеме *i*-й реализации сигнала;

$s_i(t)$, $s_j(t)$ – реализации сигнала, соответствующие *i*-му и *j*-му информационным символам $(i, j = 1...M, \quad i \neq j)$;

M – позиционность сигнала;

$\xi_T(t)$ – реализация аддитивной гауссовой помехи с равномерным спектром в полосе приема и аппроксимируемой белым шумом со спектральной плотностью мощности N_0;

$E_i = \int_0^T s_i^2(t)dt$, $E_j = \int_0^T s_j^2(t)dt$ – энергии *i*-й и *j*-й реализаций сигнала.

Положим $\tau = 0$, $\phi = 0$ и представим $s_i(t)$, $s_j(t)$, $u_T(t)$ в выражении (1) в виде суммы квадратурных составляющих:

$$s_i(t) = a_i(t)\cos\omega_0 t - b_i(t)\sin\omega_0 t \; ; \quad (2)$$

$$s_j(t) = a_j(t)\cos\omega_0 t - b_j(t)\sin\omega_0 t \; ; \quad (3)$$

$$u_T(t) = [\mu_{xi}\, a_i(t) + \alpha(t)]\cos\omega_0 t - \\ - [\mu_{yi}\, b_i(t) + \beta(t)]\sin\omega_0 t\,, \quad (4)$$

где $a_i(t)$, $b_i(t)$, $a_j(t)$, $b_j(t)$, $\alpha(t)$, $\beta(t)$ – амплитуды квадратурных составляющих реализаций сигнала и шума соответственно;

μ_{xi}, μ_{yi} – соответственно коэффициенты передачи линейного тракта для синфазной и квадратурной составляющих *i*-й реализации сигнала;

ω_0 – частота принимаемого сигнала.

Запишем амплитуды квадратурных составляющих реализаций сигнала в следующем виде:

$$\begin{aligned} a_i(t) &= dG(t)m; \\ b_i(t) &= dG(t)n; \\ a_j(t) &= dG(t)g; \\ b_j(t) &= dG(t)r, \end{aligned} \quad (5)$$

где d – половина расстояния между уровнями;

$m, n, g, r = -(L-1), -(L-3), \ldots, (L-1)$ – параметры реализаций сигнала;

$L = \sqrt{M}$ – количество уровней амплитуд квадратурных составляющих *M*-позиционного сигнала КАМ (для сигнала нечетной кратности $L = \mathrm{ceil}(\sqrt{M})$, где $\mathrm{ceil}(x)$ – функция округления до ближайшего целого в сторону увеличения);

$G(t)$ – огибающая сигнала.

Перейдем от интегрального метода приема к приему методом однократного отсчета и преобразуем левую и правую части выражения (1) с учетом (2) - (5), используя метод низкочастотных квадратурных составляющих [5]:

$$\int_0^T u_T(t)s_i(t)dt - \frac{\mu_0}{2}E_i \approx \\ \approx \frac{d^2G_0^2 m}{2}\left(\mu_{xi}m - \frac{\mu_0 m}{2} + \frac{\alpha_0}{dG_0}\right) + \\ + \frac{d^2G_0^2 n}{2}\left(\mu_{yi}n - \frac{\mu_0 n}{2} + \frac{\beta_0}{dG_0}\right); \quad (6)$$

$$\int_0^T u_T(t)s_j(t)dt - \frac{\mu_0}{2}E_j \approx \\ \approx \frac{d^2G_0^2 g}{2}\left(\mu_{xi}m - \frac{\mu_0 g}{2} + \frac{\alpha_0}{dG_0}\right) + \\ + \frac{d^2G_0^2 r}{2}\left(\mu_{yi}n - \frac{\mu_0 r}{2} + \frac{\beta_0}{dG_0}\right), \quad (7)$$

где G_0, α_0, β_0 – значения огибающей и квадратурных составляющих шума в момент принятия решений соответственно.

Тогда выражение (1) с учетом (6) и (7) примет вид

$$m\left(\mu_{xi}m - \frac{\mu_0 m}{2}\right) + \\ + n\left(\mu_{yi}n - \frac{\mu_0 n}{2}\right) + \frac{m\alpha_0 + n\beta_0}{dG_0} > \\ > g\left(\mu_{xi}m - \frac{\mu_0 g}{2}\right) + \\ + r\left(\mu_{yi}n - \frac{\mu_0 r}{2}\right) + \frac{g\alpha_0 + r\beta_0}{dG_0}, \\ m \neq g, n \neq r. \quad (8)$$

Ввиду того, что сложность технической реализации алгоритма принятия решения в соответствии с выражением (8) существенно возрастает с увеличением позиционности принимаемого сигнала, в практически реализуемых устройствах решение принимается по каждой из квадратурных составляющих сигнала в отдельности в соответствии со следующими неравенствами:

$$\begin{cases}(g-m)\left(\mu_0\dfrac{g+m}{2}-\mu_{xi}m\right)>\dfrac{(g-m)\alpha_0}{dG_0}, & m\neq g;\\ (r-n)\left(\mu_0\dfrac{r+n}{2}-\mu_{yi}n\right)>\dfrac{(r-n)\beta_0}{dG_0}, & n\neq r;\end{cases}$$

или

$$\begin{cases}\mathrm{sgn}(g-m)\left(\dfrac{g-m}{2}-k_{xi}m\right)>\dfrac{\alpha_0}{\mu_0 dG_0}, & m\neq g;\\ \mathrm{sgn}(r-n)\left(\dfrac{r-n}{2}-k_{yi}n\right)>\dfrac{\beta_0}{\mu_0 dG_0}, & n\neq r,\end{cases} \tag{9}$$

где $\mathrm{sgn}(x)=\begin{cases}1, & x>0;\\ -1, & x<0\end{cases}$ – знаковая функция;

$k_{xi}=\dfrac{\mu_{xi}-\mu_0}{\mu_0}$, $k_{yi}=\dfrac{\mu_{yi}-\mu_0}{\mu_0}$ – коэффициенты сжатия амплитудной характеристики линейного тракта для синфазной и квадратурной составляющих *i*-й реализации сигнала.

Полагая квадратурные каналы идентичными, выражение для условной вероятности ошибки в приеме символа будет иметь вид

$$P_s(k_i)\approx 2P\left\{\mathrm{sgn}(g-m)\left(\frac{g+m}{2}-k_i m\right)<\xi\right\},\ m\neq g, \tag{10}$$

где $\xi=\dfrac{\alpha_0}{\mu_0 dG_0}$ – центрированная нормально распределенная случайная величина с дисперсией $\sigma_\xi^2=\dfrac{N_0}{\mu_0^2 d^2 G_0^2 T}$;

$k_i=k_{xi}=k_{yi}$.

Полной характеристикой выражения (10) является матрица условных вероятностей ошибок [6], в данном случае размером $L\times(L-1)$, следующего вида:

$$\left\|P_{g,m}(k_i)\right\|=\left\|\begin{matrix}P_{-(L-1),-(L-3)}(k_i) & P_{-(L-1),-(L-5)}(k_i) & \dots & P_{-(L-1),L-3}(k_i) & P_{-(L-1),L-1}(k_i)\\ P_{-(L-3),-(L-1)}(k_i) & P_{-(L-3),-(L-5)}(k_i) & \dots & P_{-(L-3),L-3}(k_i) & P_{-(L-3),L-1}(k_i)\\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots\\ P_{L-3,-(L-1)}(k_i) & P_{L-3,-(L-3)}(k_i) & \dots & P_{L-3,L-5}(k_i) & P_{L-3,L-1}(k_i)\\ P_{L-1,-(L-1)}(k_i) & P_{L-1,-(L-3)}(k_i) & \dots & P_{L-1,L-5}(k_i) & P_{L-1,L-3}(k_i)\end{matrix}\right\|,\ m\neq g, \tag{11}$$

где $P_{g,m}(k_i)=P(g/m,k_i)=$ $=Q\left\{h_b\,\mathrm{sgn}(g-m)\left(\dfrac{g-m}{2}-k_i m\right)\right\}$ – вероятность приема реализации с параметром g при передаче реализации с параметром m;

$Q(y)=\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}}\int\limits_y^\infty \exp\left(-\dfrac{x^2}{2}\right)dx$ – интеграл ошибок;

$h_b^2=\dfrac{E_b}{N_0}$ – отношение энергии бита $E_b=\mu_0^2 d^2 G_0^2 T$ к односторонней спектральной плотности шума N_0.

При этом средняя вероятность появления ошибки в приеме символа есть взвешенная сумма частных показателей следующей матрицы:

$$P(k_i) = \sum_g \sum_m P(m)P(g/m, k_i) = \frac{1}{L}\sum_g \sum_m Q\left\{h_b \operatorname{sgn}(g-m)\left(\frac{g-m}{2} - k_i m\right)\right\},\ m \neq g. \quad (12)$$

Так как $P_{g,m}(k_i)$ с ростом $\frac{|g-m|}{2}$ резко убывает, то $P_{g,m}(k_i)$, для которых $\frac{|g-m|}{2} \neq 1$, положим равными нулю ($(L-1)(L-2)$ элементов матрицы (11)).

Тогда выражение (12) примет вид

$$P(k_{l-1}) = \frac{2}{L}\sum_l Q\{\ h_b\,[1 - k_{l-1}(l-1)]\},\ (13)$$

где $l = -(L-2), -(L-4), \ldots, (L-2)$;

k_{l-1} – коэффициент сжатия амплитудной характеристики линейного тракта для реализаций сигнала с уровнем амплитуд квадратурных составляющих $(l-1)$.

Подставляя выражение (13) в выражение (10) и учитывая, что отношение сигнал/шум на бит h_b^2 и на символ h^2 информации и вероятности битовой P_b и символьных P_s ошибок связаны соответственно между собой выражением вида [4]

$$h_b^2 = \frac{3}{M-1}h^2; \quad (14)$$

$$P_s \approx 2P_b \log_2 L,$$

получим формулу условной вероятности ошибки на бит:

$$P_b(k_{l-1}) = \frac{2}{L\log_2 L}\sum_l Q\left\{\sqrt{\frac{3}{M-1}}\ h\,[1 - k_{l-1}(l-1)]\right\}$$

или

$$P_b(k_{l-1}) = \frac{1}{L\log_2 L}\sum_l \operatorname{erfc}\left\{\sqrt{\frac{1,5}{M-1}}\ h\,[1 - k_{l-1}(l-1)]\right\}, \quad (15)$$

где $\operatorname{erfc}(y) = 2Q(\sqrt{2}y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_y^\infty \exp(-x^2)dx$ – дополнительная функция ошибок.

На рисунке 2 представлены соответственно графики зависимостей эквивалентных энергетических потерь приема сигналов КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256, КАМ-1024 от значений динамического диапазона по уровню компрессии минус 1 дБ для вероятностей битовых ошибок 10^{-9}, 10^{-7}, 10^{-5}, рассчитанные итерационным методом в среде ***MathCad 15*** с использованием выражения (15). При расчете полагалось, что коэффициент сжатия амплитудной характеристики линейного тракта в области значений $P_{вх.} \geq P_{вх.max}$ составляет минус 1 дБ на декаду изменения мощности входного сигнала.

Из анализа полученных графиков следует, что для обеспечения качественного приема (вероятность битовой ошибки не более 10^{-7}) минимальное значение динамического диапазона в линейном тракте должно быть не менее 35, 42, 49 и 55 дБ соответственно для сигналов КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256, КАМ-1024. При разработке требований, предъявляемых к линейным трактам перспективных ЦСПИ, указанные выше значения необходимо скорректировать в сторону увеличения на уровень прогнозируемых результирующих эквивалентных энергетических потерь приема.

При обосновании технических требований к линейным трактам проектируемых ЦСПИ минимальное необходимое значение динамического диапазона по уровню компрессии минус 1 дБ можно определить с помощью следующего эмпирического выражения:

$$Db_{-1\,дБ} = \\ = h_b^2(P_{b0}) + 20\lg(L-1) + \Delta h^2 + 10\,, \quad (16)$$

где $h_b^2(P_{b0})$ – отношение энергии бита E_b к односторонней спектральной плотности мощности шума N_0, необходимое для получения в пределе требуемой вероятности битовой ошибки, дБ;

Δh^2 – прогнозируемые результирующие эквивалентные энергетические потери при приеме сигналов, дБ.

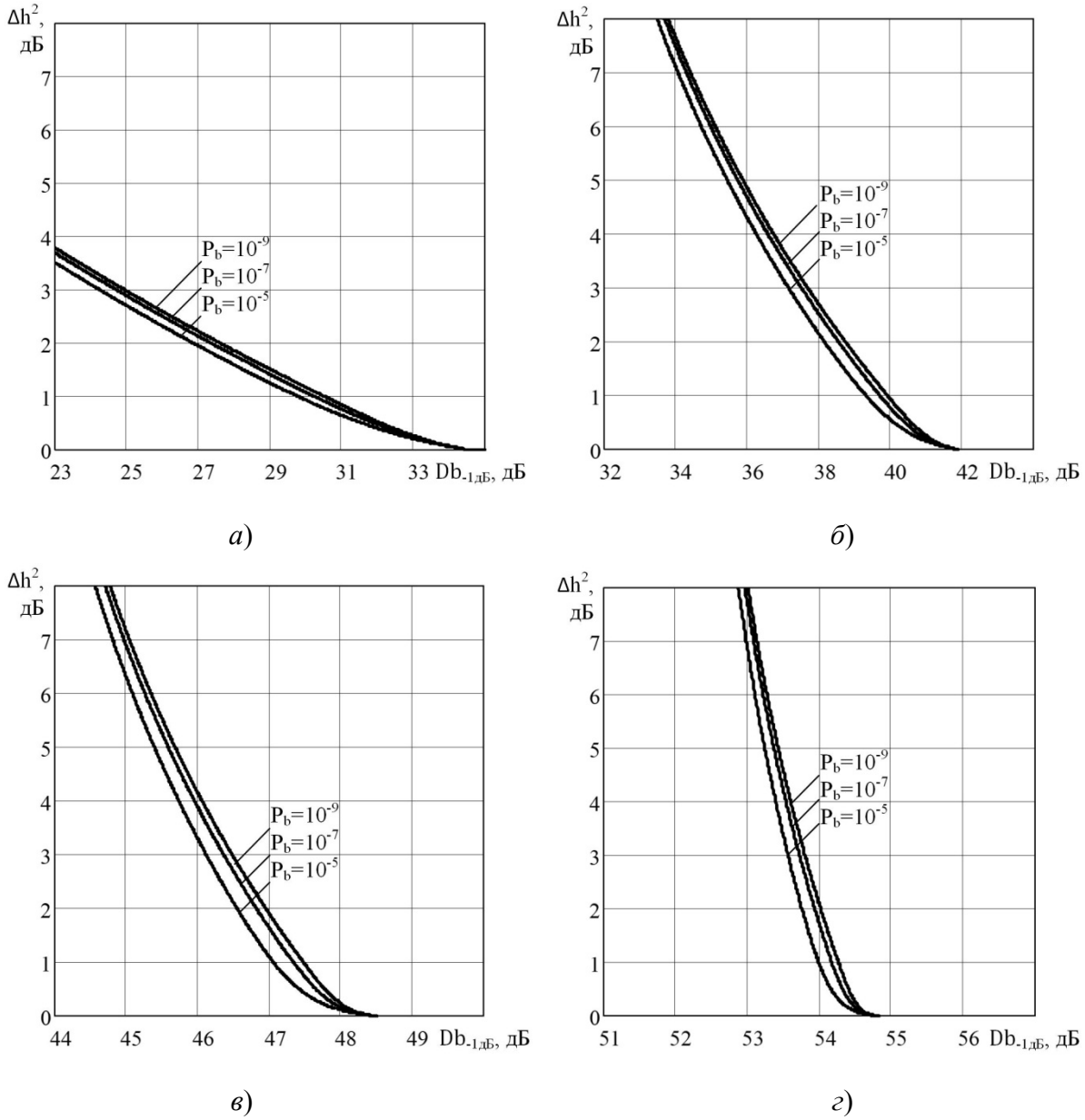


Рис. 2. Зависимость эквивалентных энергетических потерь приема от значения динамического диапазона по уровню компрессии минус 1 дБ для сигналов: *а* – КАМ-16; *б* – КАМ-64; *в* – КАМ–256; *г* – КАМ-1024

Поправочный коэффициент в выражении (16), равный десяти, характеризует разницу в 10 дБ между $P_{вх.max}$ и $P_{вх.-1\,дБ}$.

С учетом (14) выражение (16) запишем следующей формулой:

$$Db_{-1\,дБ} = h^2(P_{b0}) + \\ +10\lg\frac{3(L-1)^2}{M-1} + \Delta h^2 + 10\,. \quad (17)$$

Для сигнала высокой позиционности

$$\frac{(L-1)^2}{M-1} \approx 1. \qquad (18)$$

Тогда выражение (17) с учетом (18) примет следующий вид:

$$Db_{-1\,дБ} = h^2(P_{b0}) + \Delta h^2 + 14,8.$$

Если задаться значением вероятности битовой ошибки 10^{-7} и значением ожидаемых эквивалентных энергетических потерь на уровне 4 и 6 дБ (что соответствует реальным значениям) для сигналов типа КАМ-256 $(h^2(10^{-7}) = 33{,}4\,дБ)$ и КАМ-1024 $(h^2(10^{-7}) = 39{,}4\,дБ)$, то динамический диапазон линейного тракта ЦСПИ по уровню компрессии минус 1 дБ должен быть не менее 52 и 60 дБ соответственно, что достаточно хорошо согласуется с полученными выше результатами.

Выводы

Разработана аналитическая модель и получены графические зависимости, позволяющие оценить степень влияния компрессионных искажений на помехоустойчивость приема сигналов КАМ, а также теоретически обосновать требования к динамическому диапазону линейного тракта перспективных ЦСПИ.

Список литературы

1. Мартиросов В.Е. Влияние нелинейных (компрессионных) искажений на помехоустойчивость приема сигналов QAM // Радиотехника. – 2008. – № 9. – С. 4-11.

2. Довбня В.Г., Яковлев О.В. Влияние качества функционирования системы автоматической регулировки усиления на помехоустойчивость приема многопозиционных сигналов // Телекоммуникации. – 2004. – № 5. – С. 2-4.

3. Радиоприемные устройства / В.Н. Банков, Л.Г. Барулин, М.И. Жодзишский [и др.]; под ред. Л.Г. Барулина. – М.: Радио и связь, 1984. –272 с.

4. Прокис Дж. Цифровая связь: [пер. с англ.] / под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.

5. Макаров С.Б., Цикин И.А. Передача дискретных сообщений по радиоканалам с ограниченной полосой пропускания. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.

6. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.

Получено 30.06.15

V.G. Dovbnya, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: vit_georg@mail.ru)

A.E. Sevryukov, Senior Lecturer, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: alsevryukov@yandex.ru)

INFLUENCE OF NONLINEAR DISTORTIONS ON THE NOISE IMMUNITY OF QUADRATURE AMPLITUDE ON-OFF MODULATION SIGNAL RECEPTION

The analytical model is developed and the graphical dependences are gained, allowing to estimate influence of nonlinear distortions on a noise immunity reception of quadrature amplitude on-off modulation signal.

Key words: *nonlinear distortions, volume range, noise immunity, quadrature amplitude on-off modulation.*

УДК 681.3

А.В. Смирнов, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск)
(e-mail: innocent046@yandex.ru)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЯ АВТОМОБИЛЯ ПУТЕМ АНАЛИЗА ЕГО АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Рассматривается возможность комплексной диагностики автомобильного двигателя по издаваемому им акустическому шуму, которая включает в себя определение его состояний, объединяемых в классы, на базе известных исходных данных, а также определение неизвестных состояний двигателя путем установки их степени принадлежности к определенному классу известных состояний с помощью теории нечетких множеств применительно к диагностируемым признакам.

***Ключевые слова**: автомобильный двигатель, неисправность, диагностика, образы спектров, кодовые сообщения, класс состояний, нечеткое множество.*

***

Диагностика автомобильного двигателя – задача, требующая комплексного подхода и зависящая от множества факторов. К основным факторам, от которых зависит успех диагностики, относятся компетентность человека, проводящего диагностику, и степень «современности» автомобильного двигателя.

В реальных условиях автосервис, в котором производят полное техническое обслуживание автомобиля, включающее диагностику двигателя, может находиться за множество километров от текущего местоположения автомобиля, поэтому задача первоначальной диагностики лежит на плечах самого автомобилиста. Как следствие, оборудование, применяемое для диагностики, должно сводить к минимуму его участие в качестве эксперта, предоставляя данные, интуитивно понятные малоопытному человеку.

Виды оборудования, применяемого для этих целей, зависят от степени «современности» автомобильного двигателя.

Двигатели производства последнего десятилетия оснащены электронным блоком управления, считывающим данные с многочисленных датчиков во время поэлементной диагностики с помощью программных или портативных сканеров. К недостаткам этих сканеров относятся вариации несовместимых для разных марок двигателей протоколов информационного обмена и получение данных по принципу «как есть», включая недостоверные, если датчики системы сбоят по тем или иным причинам.

Мотор-тесты, в отличие от сканеров, замеряют параметры непосредственно с двигателя автомобиля, такие как токи датчиков, осциллограммы давления топлива, формы напряжений и так далее. Диагностика с помощью мотор-тестов дает достаточно точные, объективные результаты, однако стоимость таких приборов довольно высока [1].

Двигатели старого образца, к примеру советской сборки, проверяются другими видами оборудования, а способы диагностики заметно усложнятся. В качестве примеров можно привести замер компрессии с помощью компрессометра и проверку баланса мощности с помощью последовательного отключения цилиндров.

Описанные выше виды диагностического оборудования и способы диагностики не являются комплексными, дополняя друг друга. Обнаружение отдельных видов неисправностей может потребовать более детальной диагностики с применением оптического эндоскопа или с частичной разборкой двигателя, что отнимает на порядок больше времени и под силу лишь высококвалифицированному персоналу сервисных автоцентров.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод о целесообразности создания недорогостоящей универсальной системы для комплексной диагностики лю-

бых видов автомобильных двигателей непосредственно в дороге автомобилистом или же экспертом в сервисном центре.

В данной статье рассматривается возможность комплексной диагностики состояния автомобильного двигателя по издаваемому им акустическому шуму, позволяющая распознавать его многочисленные состояния и выявлять причину неисправности без разборки.

Шум является информативной составляющей о состоянии работающего двигателя и наблюдается в широком частотном диапазоне (0-18000) Гц [2]. Шум складывается из множества составляющих, генерируемых отдельными деталями и элементами работающего двигателя. Суммарный сигнал не стационарен.

При продолжительном времени анализа установлено, что спектр имеет высокую скорость изменения.

В работе [3] изложены способы определения наиболее информативных частотных полос для анализа спектральных составляющих акустического сигнала. В выбранном для диагностирования большинства состояний работающего автомобильного двигателя информативном частотном диапазоне (0-1000) Гц используются полосовые фильтры, настроенные на наиболее информативные места анализируемого частотного диапазона.

Экспериментально установлено, что в течение времени анализа образы спектров, представляющие общие формы спектров, изменяются гораздо медленнее самого спектра акустического шума работающего двигателя. Формы спектров можно кодировать. Частоты появления кодов будут характеризовать состояние работающего двигателя по издаваемому акустическому шуму.

В основе диагностирования состояний работающего двигателя лежат ранее разработанные методы, примененные для анализа акустических шумов объектов [4] с использованием программы [5].

Работа программы сводится к формированию образов спектра из средних значений интенсивных составляющих наиболее информативных частотных полос спектра, полученного после оцифровки звукового сигнала, поступившего на звуковую карту компьютера с микрофона, расположенного вблизи исследуемого автомобильного двигателя, или с цифрового диктофона с записями шумов двигателя. Образы спектра кодируются двоичными кодами путем сочетательного сравнения применительно ко всем частотными полосами [6], а коды создают кодовые сообщения, характеризующие диагностируемое состояние автомобильного двигателя [7, 8].

В течение времени анализа акустического шума (15 минут) диагност получает одноминутные реализации (табл. 1) [7]. Ввиду нестационарности акустического шума каждая реализация анализируемого состояния автомобильного двигателя характеризуется последовательностью случайных чисел. При синхронном считывании с интервалом времени в 1 секунду за одну минуту считывается 60 образов спектров или кодовых аналогов, выпадающих с определенной частотой, причем некоторые коды могут выпасть максимальное число раз, а другие – ни разу.

На основе данных таблицы 1 строится двумерная плоскость, на которой в виде точек отображаются состояния автомобильного двигателя (рис.). Сами точки строятся путем деления таблицы 1 на две половины, вычисления математических ожиданий частот появлений по каждому коду этих половин и вычисления математических ожиданий самих половин, которые соответствуют координатам точек состояния по осям абсцисс и ординат. Из нескольких точек, которые близко группируются и характеризуют одно состояние автомобиля, формируется класс эталонных состояний.

Таблица 1

Состояния двигателя LADA-2111(ВАЗ-2111), работающего с частотой 1000 об/мин

Состояние A_i	Реализация анализируемого состояния x_i	Коды B_j и их виды																							
		27	30	39	45	54	57	75	78	99	108	114	120	135	141	147	156	177	180	198	201	210	216	225	228
		00	04	01	06	03	07	10	14	21	46	23	47	30	54	31	56	63	67	70	74	71	76	73	77
		Частоты появления кодов k_{ij}																							
Стучит 1-й клапан	1	7	37	1	12	2	1	1	2								1						1		
	2	7	35	2	12	1	2	1	1		1														
	3	9	33	2	12	3	1	1	1		1														
	4	7	35	2	12	1	2	1	1		1														
	5	11	36	1	11	1	2		1																
	6	10	33	1	13	1	2		2			1		1											
	7	10	34	2	11	1	2	1	2	1	1				1		1								
	8	10	33	2	12	3	2	1	1	1	1														
	9	9	35	3	11	2	2		4		1		1												
	10	11	34	2	13	1	1	1	3																
	11	10	31	2	15	1	1	2	3	1	1			1											
	12	7	34	1	12	1	2	1	1	1	1				1										
	13	8	38	2	11	1	1	1	2																
	14	12	32	2	8	1	2		3		2	1	1		3					3	1	2		1	1
	15	9	37	2	10	1	1	1	2		1		1				1								
Неизвестное состояние 1	1	10	37	1	7		3		2																
	2	12	36		9				3																
	3	9	42	1	6		1	1																	
	4	11	36	2	7		1	1	2																
	5	9	35	1	10	1	1	1	2																
	6	14	29	2	8	1	3		1	1										1					
	7	11	19	3	12	1	2		5		2				1	1	2						1		
	8	12	28	1	6	1		3	5						2					1					1
	9	12	31	1	12		1		2		1														
	10	5	35	2	14	1	1	1	1																
	11	6	23	4	19	2	1		5																
	12	11	24	1	11		5	1	1								1					2	1		2
	13	10	23	2	16	3	4		1								1								
	14	11	21	2	16	3	7																		
	15	9	27	3	11	1	5		1				1		2										
Неизвестное состояние 2	1	10	39	3	4		2															1	1		
	2	2	40	4	13																				1
	3	18	24	6	10		1													1					
	4	11	28	3	10	2	4				2														
	5	13	31	1	11	4																			
	6	8	27	2	19				2					2											
	7	9	37	2	6		3		1	1							1								
	8	11	28		13	3	4		1																
	9	11	25	4	13	2	4		1																
	10	10	27	2	21																				
	11	9	30	3	9	4	1	1	2		1														
	12	10	36	1	7	2	2		2																
	13	5	42		11	1	1																		
	14	3	34	4	5						2	3			1					1	1	3		1	2
	15	12	33	2	8			1	1				1										1	1	

Рис. Классы состояний работающего двигателя

На рисунке приведено четыре класса состояний и два неизвестных состояния работающего двигателя. Данные о классах, отсутствующих в таблице 1 и присутствующих на рисунке, изложены в работах [7, 8].

Неизвестные состояния, изображенные на рисунке, можно либо визуально соотнести с классами известных состояний, либо выявить их степень принадлежности к известным классам состояний с применением решающих правил. Для этого четкое множество состояний работающего двигателя (см. табл. 1) представляют в виде нечеткого множества [8], принимая следующие условия:

– выражение $\mu_{ij} = \dfrac{k_{ij}}{k_{ij}\max}$, где $k_{ij}\max$ – максимальная частота появления кода i-реализации A_i состояния работающего автомобильного двигателя, записывается в таблицу вместо частот появления кодов;

– $y \in N!$, где y – выпадающие коды, $N!$ – весь алфавит кодов;

– $x \in A$, где x – реализации состояния A работающего двигателя;

– выражение $\mu_B\ (y||x)$, где $x \in A$, $y \in N!$, B_j – выпадающие коды из пространства $N!$, является условной функцией принадлежности.

На основе условной функции принадлежности составляется выражение для индуцирования нечеткого подмножества B нечетким подмножеством A [8, 9]:

$$\mu_{\underline{B}}(y) = \underset{x \in E_1}{MAX}(MIN[\mu_{\underline{B}}(y \,||\, x), \mu_{\underline{A}}(x)]) \,. \quad (1)$$

Таблицу 1 представляют в виде нечеткого отображения [9], с каждым B_j кодом из $N!$ проводят операции согласно выражению (1), выявляя степень принадлежности $\mu_{\underline{B}}(y)$ к эталонному состоянию A_i, после чего применяют решающие правила.

Решающее правило №1

Определение минимальной степени принадлежности к каждому эталонному состоянию A_i.

Если код №1 есть μ_1 И код №2 есть μ_2 И код № 3 есть μ_3……

И код № N! есть $\mu_{N!}$, то это состояние A_1 с min степенью принадлежности μ. (2)

Решающее правило №2

Определение степени принадлежности неизвестного состояния к каждому эталонному состоянию A_i (классу эталонных состояний).

Если $\mu\ A_1$ или $\mu\ A_2$ или …или $\mu\ A_{N!}$ max из всех min $\mu\ A_i$, то неизвестное состояние со степенью принадлежности $\mu\ A_1$ или $\mu\ A_2$ или …или $\mu\ A_{N!}$ принадлежит A_1 или A_2 или …или $A_{N!}$ состоянию. (3)

Выбирается максимальная принадлежность из минимальных, неизвестное состояние принадлежит максимальной принадлежности из минимальных (табл. 2).

Таблица 2

Применение решающих правил к состояниям двигателя LADA-2111(ВАЗ-2111), работающего с частотой 1000 об/мин

Состояние A_i	Реализация анализируемого состояния x_i	Коды B_j и их виды																							
		27	30	39	45	54	57	75	78	99	108	114	120	135	141	147	156	177	180	198	201	210	216	225	228
		00	04	01	06	03	07	10	14	21	46	23	47	30	54	31	56	63	67	70	74	71	76	73	77
		Степени принадлежности неизвестного состояния к эталонным состояниям A_i																							
Стучит 1-й клапан + неизвестное состояние 1	1	0,6	0,9	0,3	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
	2	0,6	0,9	0	0,5	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
	3	0,6	0,9	0,3	0,3	0	0,1	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
	4	0,6	0,9	0,5	0,4	0	0,1	0,3	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
	5	0,6	0,8	0,3	0,5	0,3	0,1	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
	6	0,8	0,7	0,3	0,4	0,3	0,4	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
	7	0,8	0,5	0,7	0,6	0,3	0,3	0	0,5	0	0,5	0	0	0	0,3	0	1			0	0	0	0	0	0
	8	0,8	0,7	0,3	0,3	0,3	0	0,5	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
	9	0,8	0,7	0,3	0,6	0	0,1	0	0,4	0	0,5	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
	10	0,4	0,8	0,5	0,7	0,3	0,1	0,3	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
	11	0,4	0,5	0,7	1	0,3	0,1	0	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
	12	0,6	0,6	0,3	0,6	0	0,7	0,3	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
	13	0,7	0,5	0,5	0,7	0,3	0,5	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
	14	0,8	0,5	0,5	0,5	0,3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
	15	0,6	0,6	0,7	0,6	0,3	0,5	0	0,2	0	0	0	1	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0
	Операция MIN																								
	max	0,8	0,9	0,7	1	0,3	1	0,5	0,8	0	0,5	0	1	0	0,3	0	1			0	0	0	0	0	0
Стучит 1-й клапан + неизвестное состояние 2	1	0,6	0,9	0,3	0,2	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0		0			0	0	0	1	0	0
	2	0,1	0,9	0,7	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0			0	0	0	0	0	0
	3	0,8	0,6	0,7	0,5	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0		0			0	0	0	0	0	0
	4	0,6	0,7	0,5	0,5	0,3	1	0	0	0	0,5	0	0	0	0		0			0	0	0	0	0	0
	5	0,7	0,7	0,2	0,5	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0			0	0	0	0	0	0
	6	0,4	0,6	0,3	0,9	0	0	0	0,5	0	0	0	0	1	0		0			0	0	0	0	0	0
	7	0,5	0,9	0,3	0,3	0	0,8	0	0,5	1	0	0	0	0	0		1			0	0	0	0	0	0
	8	0,6	0,7	0	0,6	0,8	1	0	0,3	0	0	0	0	0	0		0			0	0	0	0	0	0
	9	0,6	0,6	0,7	0,6	0,5	1	0	0,5	0	0	0	0	0	0		0			0	0	0	0	0	0
	10	0,6	0,6	0,3	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0			0	0	0	0	0	0
	11	0,5	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3	1	0,8	0	0,5	0	0	0	0		0			0	0	0	0	0	0
	12	0,6	0,9	0,2	0,3	0,3	0,5	0	0,3	0	0	0	0	0	0		0			0	0	0	0	0	0
	13	0,3	1	0	0,5	0,3	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0		0			0	0	0	0	0	0
	14	0,2	0,8	0,7	0,2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1		0			1	1	1	0	1	1
	15	0,7	0,8	0,3	0,4	0	0	0,5	0,5	0	0	0	1	0	0		0			0	0	0	0	0	0
	Операция MIN																								
	max	0,8	1	0,7	0,9	0,8	1	1	0,8	1	1	1	1	1	1		1			1	1	1	1	1	1

После проведения идентичных вычислений с применением решающих правил (2) и (3) для всех классов эталонных состояний, изображенных на рисунке, получены следующие степени принадлежности неизвестных состояний:

1) неизвестное состояние 1 принадлежит каждому из известных классов состояний со степенью принадлежности $\mu_{\underline{B}}(y)=0$;

2) неизвестное состояние 2 принадлежит классу состояний со стучащим 1-м клапаном со степенью принадлежности $\mu_{\underline{B}}(y)=0{,}7$, всем остальным классам известных состояний – со степенью принадлежности $\mu_{\underline{B}}(y)=0$.

Полное распознавание состояния подразумевает равенство единице степени принадлежности по каждому коду, т.е. $\mu_i = 1$ (центр класса). В описанных выше

результатах получено максимально возможное приближение, удовлетворяющее условиям поставленной задачи. Следует отметить, что для повышения степени принадлежности в принятии решения к диагностируемому состоянию необходимо иметь большее количество классов известных состояний. Также целесообразно рассмотреть возможность анализа акустического шума в частотном интервале (1000-18000) Гц.

Таким образом, в рассмотренной статье была показана возможность распознавания состояний автомобильного двигателя на основе анализа его акустического шума в частотном диапазоне (0-1000) Гц с использованием кодовых сообщений, а также возможность выявления его причины неисправности путем установки степени принадлежности неизвестных состояний к классам известных состояний с использованием нечетких множеств.

Список литературы

1. AVTO MEDIA PORTAL. Приборы для диагностики автомобиля [Электронный ресурс]. – URL: http://www.avto-pulss.ru/remont-avto/620-diagnostika-avto-mobilya.html, свободный (дата обращения: 25.06.2015).

2. Дрейзин В.Э., Касем М.М., Сабельников Д.С. Акустическая диагностика автомобильных двигателей. Анализ возможностей и теоретические и практические предпосылки // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – №4. – С. 48-56.

3. Пат. 2287138 Рос. Федерация, G01H 17/00, A01K 55/00. Способ определения информативных частотных полос акустического сигнала пчелиных семей при распознавании их состояний / Рыбочкин А.Ф. Опубл. 10.11.2006, Бюл.31.

4. Рыбочкин А.Ф., Яковлев А.И. Диагностирование состояний объектов по издаваемому ими акустическому шуму // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – №7. – С. 89-101.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы № 2012617781. Программа для анализа и кодирования акустических шумов (CodeBee v.1.1) / Савельев С.В., Мохсен Шамсан Ахмед Исмаил, Рыбочкин А.Ф. Зарегистрировано в Реестре программ на ЭВМ.

6. Рыбочкин А.Ф., Савельев С.В. Кодирование образов спектров при анализе акустического шума с использованием программы для ЭВМ // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2013. – №2. – С. 88-94.

7. Смирнов А.В., Рыбочкин А.Ф. Построение классов состояний автомобильного двигателя по издаваемому им акустическому шуму // Математические методы и инновационные научно-технические разработки: сб. науч. трудов; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2014. – С. 28-32.

8. Рыбочкин А.Ф., Смирнов А.В. Установление принадлежности неизвестного состояния автомобильного двигателя к установленным классам состояний путём анализа акустического шума работающего двигателя // Математические методы и инновационные научно-технические разработки: сб. науч. трудов; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2014. – С. 32-40.

9. Кофман А. Введение в теорию нечётких множеств. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.

Получено 30.06.15

A. Smirnov, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: innocent046@yandex.ru)

DETERMINATION OF AUTOMOBILE ENGINE CONDITION BASED ON THE ANALYSIS OF ACOUSTIC NOISE WITH USING OF FUZZY SET THEORY

In this article, we consider the possibility of a comprehensive diagnosis of car engine condition by acoustic noise analyzing. Firstly, this diagnosis includes recognition of engine conditions based on initial data and besides engine conditions united into classes of conditions. Secondly, this diagnosis includes determination of grade of mem-

bership of unknown engine conditions to a particular class of known conditions. This part of diagnosis is based on the usage of fuzzy set theory to diagnosable symptoms.

***Key words**: automobile engine, engine trouble, diagnosis, patterns of spectra, code message, class of conditions, fuzzy set.*

УДК 004.052.32+004.312

Нян Лин, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск)
(e-mail: nyanlin@mail.ru)

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА МЕЖМОДУЛЬНОГО ВЗАИМОКОНТРОЛЯ ЛОГИЧЕСКИХ МУЛЬТИКОНТРОЛЛЕРОВ

Предложен параллельный алгоритм организации распределенного контроля модулей логических мультиконтроллеров, рассмотрены особенности его аппаратной реализации.

***Ключевые слова**: логический мультиконтроллер, надежность, контроль, параллельный алгоритм, аппаратная реализация.*

***

Межмодульный взаимоконтроль представляет собой перспективный механизм организации встроенного аппаратного контроля логических мультиконтроллеров (ЛМК) [1]. Он позволяет существенно ослабить зависимость вероятности правильной локализации отказа от надежности и контролирующей способности отдельных блоков контроля, распределенных между модулями ЛМК [2]. В данной статье представлен параллельный алгоритм организации аппаратного межмодульного взаимоконтроля в мультиконтроллерах произвольной размерности $d \geq 2$, а также рассмотрены особенности его реализации на уровне аппаратных средств.

Разработанный алгоритм (рис.1) имеет циклический характер и выполняется, пока данный модуль работоспособен (оператор 3). Каждый цикл предполагает выборку очередной команды контроля $T^{x_1 x_2 \ldots x_d}(k)$ (оператор 7), ее выдачу контролируемым соседям текущего модуля (оператор 8), получение от них множества слов отклика $\left\{R^{x_1^i x_2^i \ldots x_d^i}(k)\right\}$ (оператор 12), принятие решения о работоспособности или отказе этих модулей (операторы 14, 15). Алгоритм включает $d(d-1)+1$ идентичных параллельных ветвей $B_1, B_2, \ldots, B_{d(d-1)+1}$, каждая из которых соответствует одному из контролируемых соседей.

В алгоритме имеется 3 блока: A, B и C (выделены пунктиром). Блок A обеспечивает отсчет времени ожидания $\tau_0^{\max}$ до следующего цикла контроля и формирование команды контроля $T^{x_1 x_2 \ldots x_d}(k)$. Блок B реализует выдачу этой команды соседнему модулю $u_{x_1^i x_2^i \ldots x_d^i}$ и отсчет времени ожидания отклика $\tau_i^{\max}$. Блок C осуществляет прием отклика $R^{x_1^i x_2^i \ldots x_d^i}(k)$ от модуля $u_{x_1^i x_2^i \ldots x_d^i}$, формирование эталона $R^{x_1 x_2 \ldots x_d}(k)$, сравнение полученного отклика с эталоном и сброс признака работоспособности $\varphi_{x_1^i x_2^i \ldots x_d^i}^{x_1 x_2 \ldots x_d}$ в случае несовпадения.

Назначение используемых в алгоритме обозначений определяется согласно таблице 1.

Разработанный алгоритм отличается параллельной передачей команд контроля $d(d-1)+1$ ближайшим соседям текущего модуля, параллельным приемом и анализом их отклика, а также позволяет конфигурировать процедуру непосредственной проверки состояния соседнего модуля с учетом особенностей структурно-функциональной организации модуля. Алгоритм характеризуется высокой степенью параллелизма и включает только элементарные аппаратно реализуемые операции и условия, что обеспечивает возможность его эффективного воплощения в современном элементном базисе на аппаратном уровне.

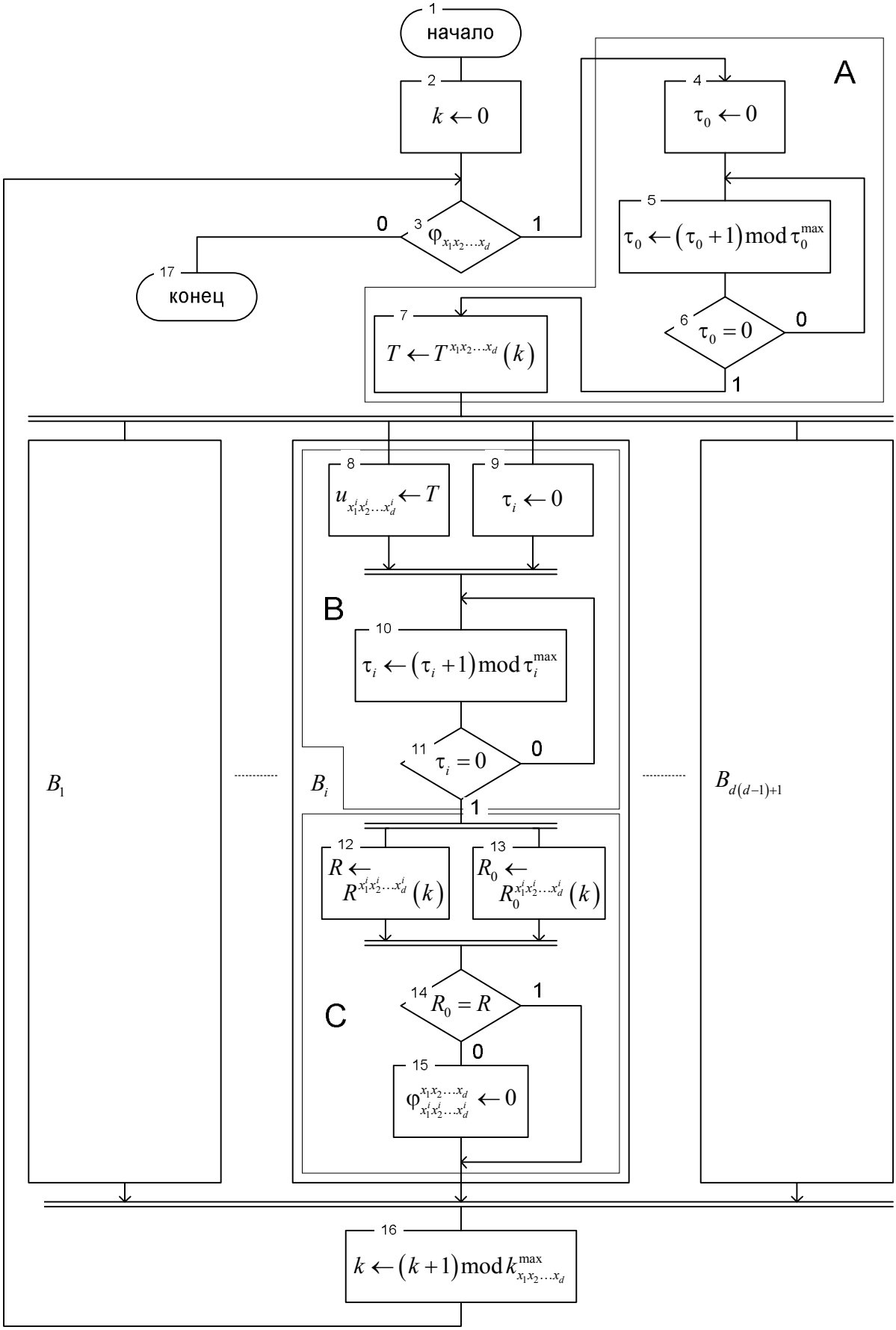


Рис.1. Граф-схема алгоритма контроля модулей мультиконтроллера

Таблица 1

Обозначения, используемые в алгоритме

№ п/п	Обозначение	Физический смысл
1	$k^{\max}_{x_1x_2\ldots x_d}$	Общее число команд контроля, выполняемых текущим модулем $u_{x_1x_2\ldots x_d}$
2	$k,\ k=\overline{0,k^{\max}_{x_1x_2\ldots x_d}-1}$	Номер текущей команды контроля
3	$\tau_0^{\max}$	Интервал времени между смежными циклами контроля (в тактах)
4	τ_0	Счетчик ожидания следующего цикла контроля
5	$\tau_i^{\max},\ i=\overline{1,d(d-1)+1}$	Время ожидания отклика от модуля $u_{x_1^ix_2^i\ldots x_d^i}$
6	$\tau_i,\ i=\overline{1,d(d-1)+1}$	Счетчик ожидания отклика от модуля $u_{x_1^ix_2^i\ldots x_d^i}$
7	$T^{x_1x_2\ldots x_d}(k)$	k-я команда контроля, выполняемая текущим модулем $u_{x_1x_2\ldots x_d}$
8	$R^{x_1^ix_2^i\ldots x_d^i}(k)$	Отклик модуля $u_{x_1^ix_2^i\ldots x_d^i}$ на команду $T^{x_1x_2\ldots x_d}(k)$
9	$R_0^{x_1^ix_2^i\ldots x_d^i}(k)$	Эталонный отклик модуля $u_{x_1^ix_2^i\ldots x_d^i}$ на команду $T^{x_1x_2\ldots x_d}(k)$
10	T,R,R_0	Дополнительные буферные переменные
11	$\leftarrow$	Знак операции присваивания / пересылки значения

На рисунке 2 представлена укрупненная структура модуля двумерного мультиконтроллера, оборудованного средствами взаимоконтроля, реализующими разработанный параллельный алгоритм.

Через $T^{xy}_{x'y'}$ на рисунке 2 условно обозначены потоки команд контроля и отклика, передаваемые между модулями u_{xy} и $u_{x'y'}$ (u_{xy} в данном случае является контролирующим, а $u_{x'y'}$ – контролируемым); $\varphi^{xy}_{x'y'}$ – признак работоспособности модуля $u_{x'y'}$, формируемый модулем u_{xy}; φ_{xy} – обобщенный признак работоспособности модуля u_{xy}. Каждый блок контроля соседей (БКС) обеспечивает выдачу команд контроля, анализ отклика и формирование соответствующего признака работоспособности $\varphi^{xy}_{x'y'}$.

Значения признака $\varphi^{xy}_{x'y'}$ определяются следующим образом: $\varphi^{xy}_{x'y'}=1$, если модуль u_{xy} «считает» модуль $u_{x'y'}$ работоспособным, и $\varphi^{xy}_{x'y'}=0$ – иначе. Признак φ_{xy} определяется согласно следующей формуле:

$$\varphi_{xy}=\#\left(\varphi_{xy}^{(x+(1-\mathrm{sign}(x))n-1),y},\varphi_{xy}^{(x+(1-\mathrm{sign}(x))n-1),(y+(1-\mathrm{sign}(y))m-1)},\varphi_{xy}^{x,(y+(1-\mathrm{sign}(y))m-1)}\right),\qquad(1)$$

где # – символ мажоритарной операции; при $\varphi_{xy}=1$ модуль u_{xy} рассматривается как работоспособный, а при $\varphi_{xy}=0$ как отказавший.

Для ЛМК размерности $d>2$ выражения для вычисления признака работоспособности модуля φ можно записать аналогично (1).

Например, для трехмерной матрицы оно примет вид

$$\varphi_{xyz} = \#\left(\begin{array}{c} \varphi_{xyz}^{(x+(1-\mathrm{sign}(x))n-1),y,z}, \varphi_{xyz}^{x,(y+(1-\mathrm{sign}(y))m-1),z}, \varphi_{xyz}^{x,y,(z+(1-\mathrm{sign}(z))p-1)}, \\ \varphi_{xyz}^{(x+(1-\mathrm{sign}(x))n-1),(y+(1-\mathrm{sign}(y))m-1),z}, \varphi_{xyz}^{(x+(1-\mathrm{sign}(x))n-1),y,(z+(1-\mathrm{sign}(z))p-1)}, \\ \varphi_{xyz}^{x,(y+(1-\mathrm{sign}(y))m-1),(z+(1-\mathrm{sign}(z))p-1)}, \varphi_{xyz}^{(x+(1-\mathrm{sign}(x))n-1),(y+(1-\mathrm{sign}(y))m-1),(z+(1-\mathrm{sign}(z))p-1)} \end{array}\right). \quad (2)$$

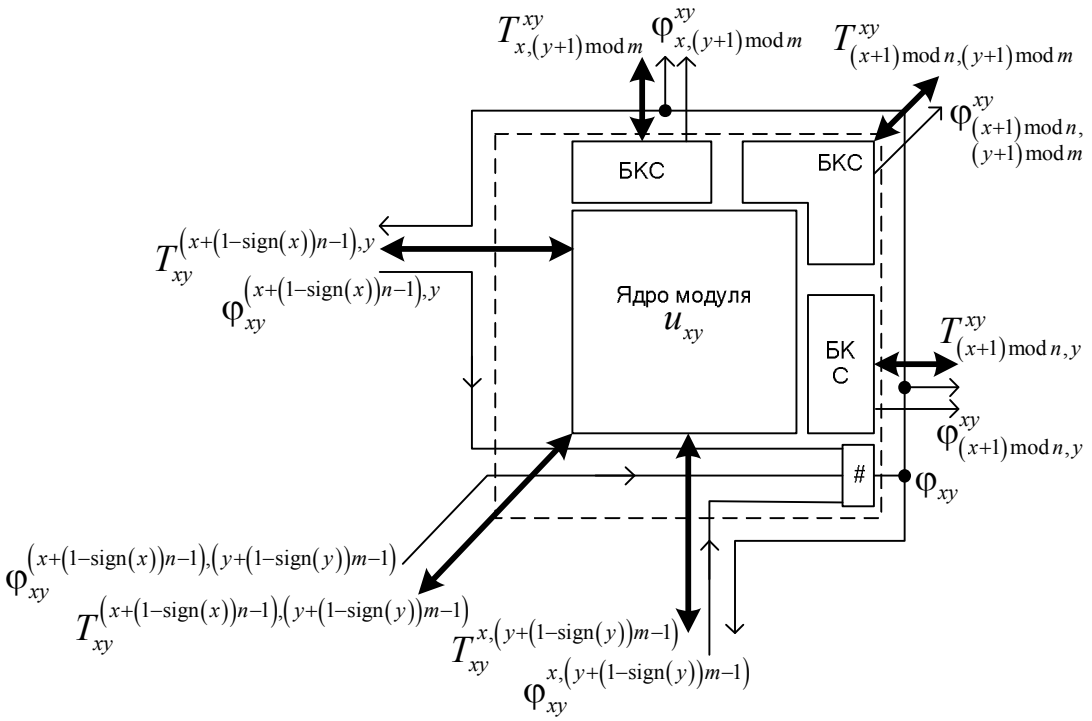


Рис. 2. Укрупненная структура модуля двумерного ЛМК, оборудованного средствами взаимоконтроля

Функциональная схема аппаратных средств межмодульного взаимоконтроля (*d*-мерный случай) представлена на рисунке 3.

Фрагменты этой схемы, относящиеся к ядру контроллера, а также образующие БКС, обведены пунктиром. Учитывая идентичность БКС, детализирован только первый блок. Назначение элементов и блоков устройства, приведенного на рисунке 3, сведено в таблицу 2.

Таблица 2

Назначение элементов и блоков устройства

№ п/п	Наименование и номер(а) позиции	Назначение элемента или блока
1	Блок 1 постоянной памяти	Хранение и выдача команд контроля
2	Кольцевой счетчик 2	Отсчет времени между смежными циклами контроля
3	Кольцевой счетчик 3	Перебор команд контроля, размещенных в блоке 1
4	Триггер 4	Запоминание факта перехода счетчика 2 в нулевое состояние
5	Элемент И 5	Блокировка воздействия синхроимпульсов с входа CLK на счетчик 2
6	Элемент И 6	Блокировка воздействия синхроимпульсов с входа CLK на счетчик 3

Окончание табл. 2

№ п/п	Наименование и номер(а) позиции	Назначение элемента или блока
7	Элемент ИЛИ-НЕ 7, одновибратор 9	Детектирование момента возврата счетчика 2 в нулевое состояние
8	Элемент ИЛИ 8	Объединение импульсов сброса триггера 4
9	Одновибратор 10	Формирование импульса, разрешающего запуск параллельных контролирующих процедур в соответствующих БКС
10	Блок 11 постоянной памяти	Хранение и выдача эталонов отклика *i*-го контролируемого соседа на команды контроля
11	Кольцевой счетчик 12	Отсчет задержки приема отклика от *i*-го контролируемого соседа
12	Элемент ИЛИ-НЕ 18, одновибратор 20	Детектирование момента возврата счетчика 12 в нулевое состояние
13	Триггер 13	Запоминание факта перехода счетчика 12 в нулевое состояние
14	Триггер 14	Хранение текущего значения признака работоспособности модуля
15	Компаратор 15	Сравнение отклика *i*-го контролируемого соседа с эталоном из блока 11
16	Элемент И 16	Блокировка воздействия синхроимпульсов с входа CLK на счетчик 12
17	Элемент И 17	Блокировка прохождения импульса сброса триггера 14
18	Элемент ИЛИ 19	Объединение импульсов сброса триггера 13
19	Одновибратор 21	Формирование импульса сброса триггера 14

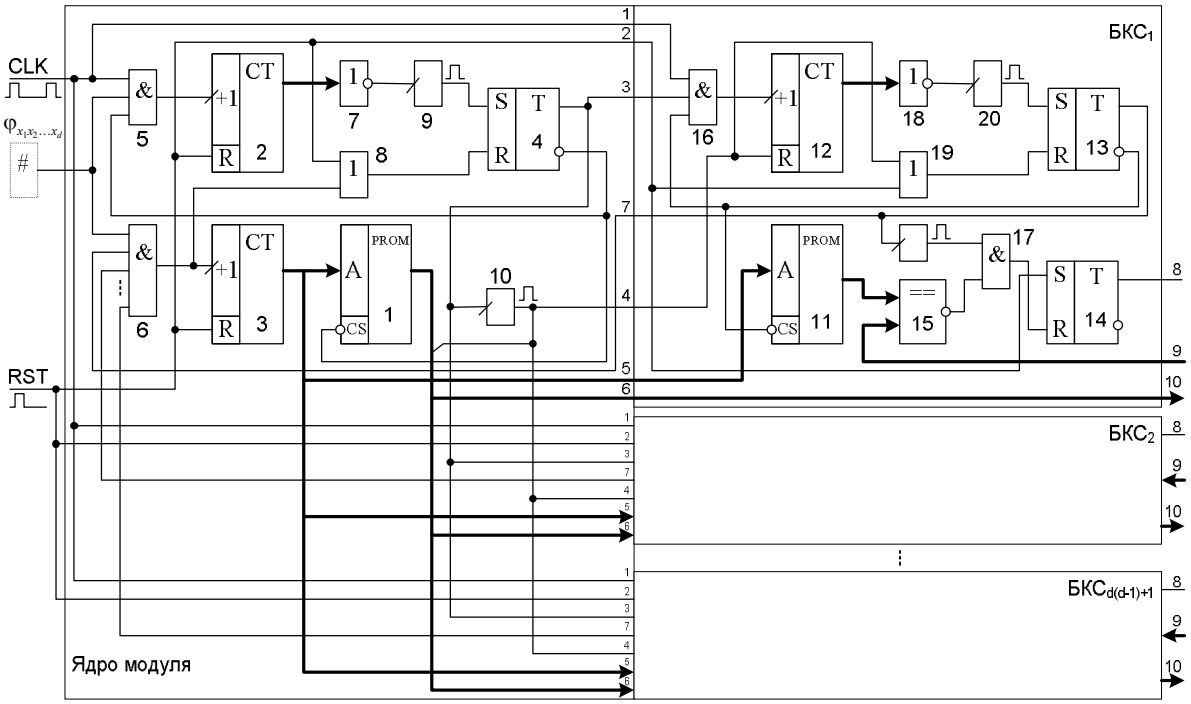


Рис.3. Функциональная схема аппаратных средств взаимоконтроля

Разработанная организация аппаратных средств оперативного контроля отличается наличием в каждом модуле параллельно работающих блоков, реализующих выдачу команд опроса $d(d-1)+1$ ближайшим соседям, и блоков анализа отклика $d(d-1)+1$ ближайших соседей, а также матрицы мажоритарных элементов, формирующих признаки состояния соответствующих модулей по результатам контроля со стороны их ближайших соседей, что позволяет реализовать оперативный параллельный контроль всех модулей ЛМК любой размерности $d \geq 2$ с использованием произвольной процедуры непосредственной проверки соседнего модуля.

1. Нян Лин, Бредихин Р.В., Зотов И.В. Об организации встроенного аппаратного взаимоконтроля в логических мультиконтроллерах // Изв. вузов. Серия: Приборостроение. – 2013. – Т. 56, № 6. – С. 44-49.

2. Принципы организации встроенного аппаратного межмодульного взаимоконтроля в матричных логических мультиконтроллерах / И.В. Зотов, Р.В. Бредихин, Л.А. Лисицин, Нян Лин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2013. – №1. – С. 202-208.

Получено 10.07.15

Nyan Lin, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk) (e-mail:nyanlin@mail.ru)

PARALLEL ALGORITHM AND HARDWARE OF INTERMODULAR MUTUALLY CONTROL OF LOGICAL MULTICONTROLLERS

A parallel algorithm for distributed error checking of logical multi-controller units is proposed, a hardware-level implementation thereof is considered.

***Key words**: logical multi-controller, reliability, error checking, parallel algorithm, hardware-level implementation.*

УДК 681.3

И.А. Мартынов, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: morzee@inbox.ru)

ОЦЕНКА АППАРАТНОЙ СЛОЖНОСТИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ БЫСТРОЙ АППАРАТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ БИНАРНЫХ ОТНОШЕНИЙ ВЕРШИН ГРАФ-СХЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ

В статье рассмотрена задача аппаратно-ориентированной классификации бинарных отношений вершин граф-схем параллельных алгоритмов, возникающая при проектировании систем логического управления в базисе логических мультиконтроллеров, при автоматизированном распараллеливании вычислений и др. Программная реализация указанных действий является сравнительно медленной, ввиду чего с целью сокращения затрат времени на выполнение классификации отношений предложено выполнять ее с использованием специализированного аппаратно-ориентированного акселератора. В данной статье приведено краткое описание его структуры, базирующееся на использовании специализированной многопортовой памяти с матричной структурой и специализированной схемотехнической реализации операции умножения битовых векторов. В ходе выполненной оценки аппаратной сложности показано, что по сравнению с известными устройствами на базе систолических структур с матричной организацией предложенное устройство обладает как минимум на порядок меньшей аппаратной сложностью.

***Ключевые слова**: классификация бинарных отношений, умножение матриц, проектирование специализированных вычислительных средств, граф-схемы параллельных алгоритмов.*

***

В различных задачах, к которым относятся задачи проектирования однородных многомодульных мультисистем [1–4], в том числе систем логического управления (СЛУ) в базисе логических мультиконтроллеров, задачи параллельной обработки информации [5], задачи на графах, связанные с проверкой связности, достижимости и контрдостижимости и пр., возникает необходимость в обработке и анализе графов различного вида. Специальным подклассом графов, обладающим рядом особых свойств [6–9], являются граф-схемы параллельных алгоритмов. В ряде задач (например, при поиске разбиений [3–4], оценке степени параллелизма граф-схемы [6, 10], оценке интенсивности межмодульного обмена [11] и пр.) возникает необходимость в классификации бинарных отношений вершин граф-схем параллельных алгоритмов, к которым относятся [12] отношения следования (ν), связи (φ), параллельности (ω) и альтернативы (ψ).

В совокупности указанная система бинарных отношений обладает рядом особых свойств, на базе которых возможно их последовательное определение при программной реализации указанных действий. Однако при этом на построение матрицы отношений M_R [12], используемой для их хранения, затрачивается [13] существенное (до 20%) количество вычислительного времени, которое можно сократить путем переноса данных операций с программного уровня на аппаратный в ходе разработки специализированного аппаратно-ориентированного акселератора [14–17], структура которого жестко адаптирована к условиям решаемой задачи. Сокращение затрат времени, затрачиваемого на классификацию отношений, приводит к повышению коэффициента готовности СЛУ на этапе ее работы и повышению производительности труда на этапе проектирования.

Структурная схема разработанного устройства-акселератора приведена на рис. 1.

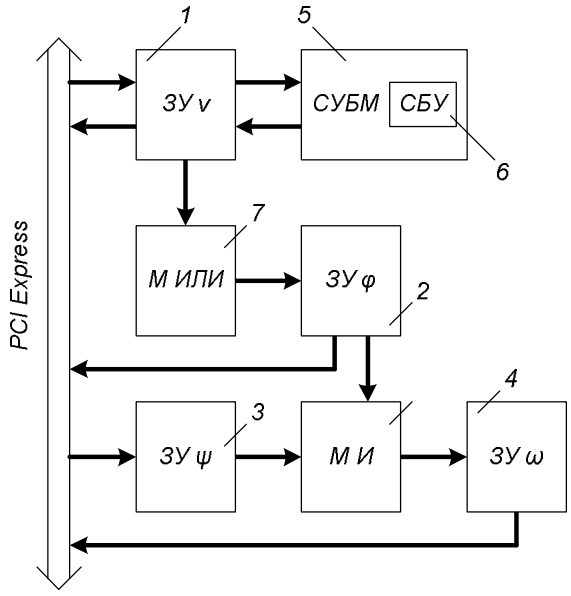


Рис. 1. Структурная схема устройства-акселератора для классификации бинарных отношений

Оно включает в своем составе запоминающие устройства (ЗУ) 1–4 для хранения бинарных отношений следования, связи, параллельности и альтернативы соответственно, схему транзитивного замыкания (СТЗ) 5, схему битового умножения векторов (СБУ) 6, а также матрицы логических элементов ИЛИ 7 и И 8.

Запоминающие устройства подключены к шине PCI Express с целью загрузки исходных данных для построения матрицы отношений и выгрузки результата. В соответствии с рассмотренным выше алгоритмом на первом шаге работы устройства производится загрузка начальных значений для определения отношения следования.

Вслед за этим в работу вступает схема умножения битовых матриц, которая с использованием схемы умножения битовых векторов в соответствии с рассмотренным выше алгоритмом, базирующемся на алгоритме Флойда-Уоршалла, производит нахождение транзитивного замыкания отношения следования:

$$\forall i, j, k = \overline{1, N}: \left(a_i \nu a_j\right) \wedge \left(a_j \nu a_k\right) \rightarrow \left(a_i \nu a_k\right),$$

где N – число вершины в составе граф-схемы алгоритма $G = \langle A, V \rangle$;

$A = \{a_1, a_2, ..., a_N\}$ – множество вершин, $|A| = N$;

$V = \{v_1, v_2, ..., v_M\}$ – множество дуг передачи управления, $M = |V|$,

после чего обновленная матрица отношения следования может быть выгружена в оперативную память.

Затем с использованием матрицы элементов ИЛИ 7 возможно определение значений отношения связи

$$\forall i, j = \overline{1, N}: (a_i \nu a_j) \vee (a_j \nu a_i) \to (a_i \varphi a_j),$$

которое формируется в ЗУ 2, после чего может быть выгружено в оперативную память. Параллельно с определением значений следования и связи возможна загрузка отношения альтернативы, определяемого на программном уровне, в ЗУ 3.

После определения матриц отношений связи и альтернативы с использованием матрицы элементов И возможно определение отношения параллельности

$$\forall i, j = \overline{1, N}: \neg(a_i \varphi a_j) \wedge \neg(a_i \psi a_j) \to (a_i \omega a_j),$$

записываемого в ЗУ 4 и затем выгружаемого в оперативную память.

При программной обработке матрица M_R хранится в оперативной памяти в виде двумерного массива множеств (битовых векторов), элементы которого располагаются в памяти подряд. При аппаратно-ориентированной обработке данный способ хранения является неудобным, т.к. при каждом обращении требуется вычисление соответствующего адреса, что, в свою очередь, приводит к появлению в схеме дополнительных сумматоров и блоков умножения (последние могут быть заменены на сдвигатели при условии кратности N степени двойки), увеличивая аппаратную сложность, тепловыделение и время задержки распространения сигнала. Выходом из положения является разработка специализированного двухкоординатного запоминающего устройства [14], ориентированного на хранение именно матричной информации, структурная схема ячейки которого приведена на рис. 2.

Условное обозначение однородной среды, базирующейся на объединении ячеек (см. рис. 2), приведено на рис. 3.

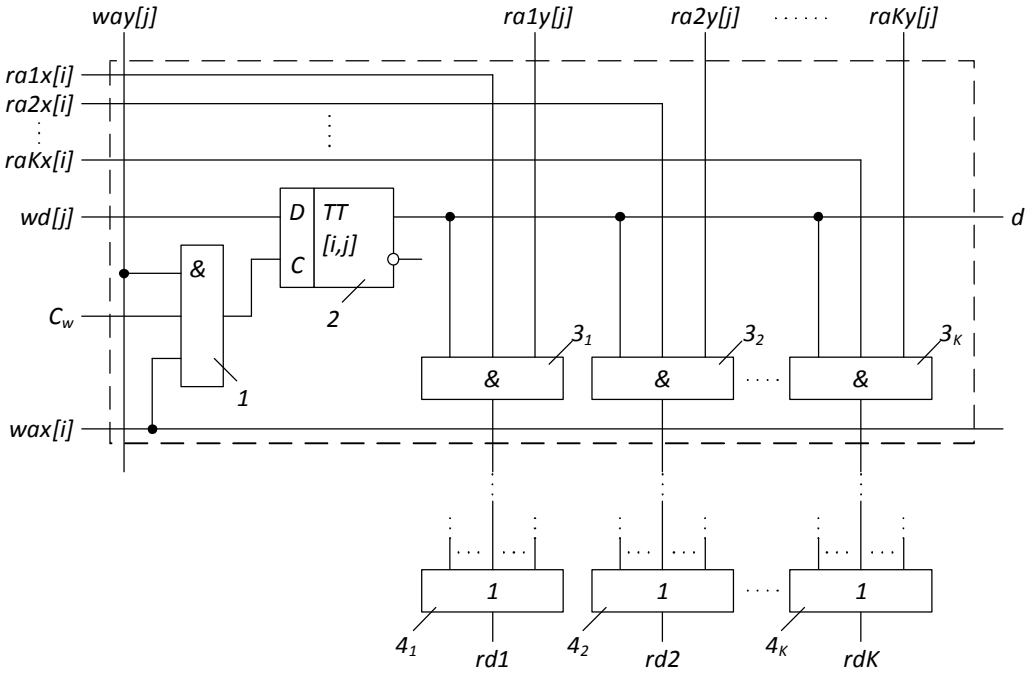


Рис. 2. Схема ячейки однородной запоминающей среды для хранения битовых признаков отношения следования

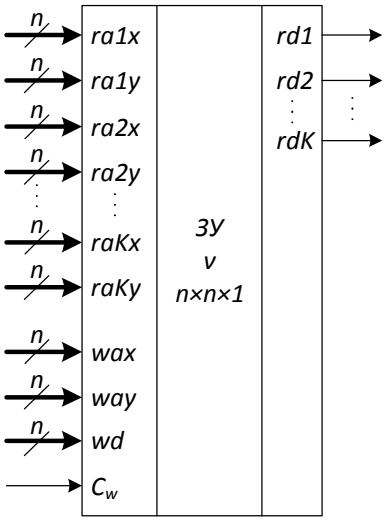


Рис. 3. Условное обозначение запоминающего устройства для хранения бинарного отношения следования

По сравнению с однородной средой [18] предложенная ячейка упрощена за счет исключения элементов, реализующих ассоциативные операции, а среда имеет двухкоординатную адресацию вместо однокоординатной, несмотря на внешнее сходство.

Схемотехническая реализация операции булева умножения (СБУ) *i*-й строки на *j*-й столбец матрицы M_R приведена на рис. 4 [16].

В основе ее работы лежит принцип, согласно которому из ЗУ поочередно выбираются соответствующие элементы умножаемых векторов, после чего производится их побитовое умножение. В случае если в результате умножения на одном из шагов работы схемы получается единичное значение, оно фиксируется в триггере 5 и формирует единичное значение признака готовности Θ на выходе элемента ИЛИ 10, и работа схемы досрочно прекращается.

При использовании предложенной схемотехнической реализации выигрыш в скорости обработки достигается за счет использования рассмотренного выше специализированного запоминающего устройства, позволяющего адресацию отдельных бит информации и параллельное выполнение операций чтения и записи в различные ячейки с использованием различных портов (до 4-х параллельно выполняемых операций в предложенной схеме). Также число итераций снижено по сравнению с программной реализацией за счет ранней проверки факта установления достижимости.

С использованием схемы битового умножения векторов представляется возможным реализовать схему умножения матрицы самой на себя [17] с целью нахождения транзитивного замыкания бинарного отношения следования (рис. 5).

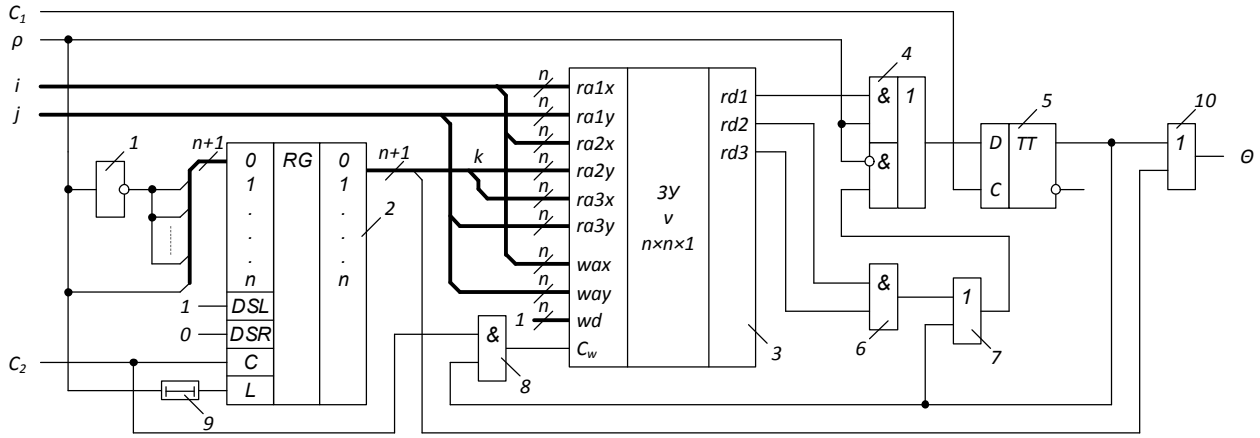


Рис. 4. Схемотехническая реализация операции булева умножения строки и столбца

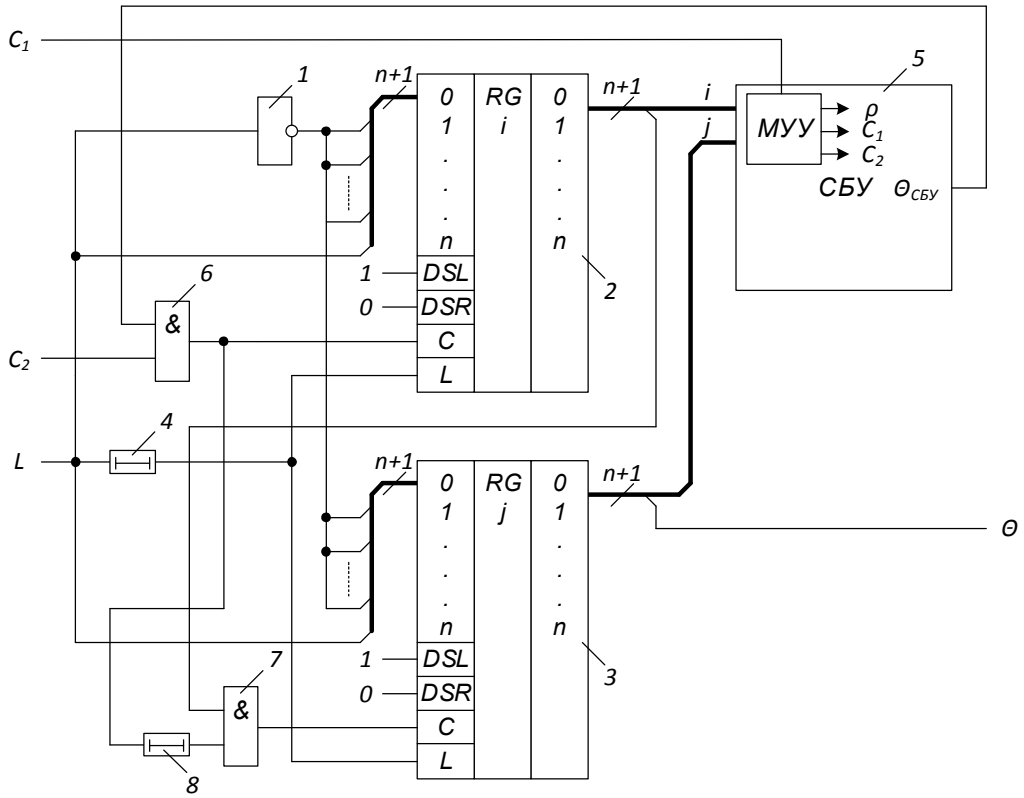


Рис. 5. Схемотехническая реализация операции умножения битовой матрицы самой на себя (схема транзитивного замыкания, СТЗ)

Она обеспечивает поочередную выборку строк и столбцов обрабатываемой бинарной матрицы (два внешних цикла в алгоритме Флойда-Уоршалла) с последующей их передачей на вход схемы СБУ для выполнения умножения битовых векторов.

Аппаратная реализация матриц элементов ИЛИ 7 и И 8 (см. рис. 1) тривиальна и включает в своем составе в простейшем случае N^2 соответствующих двухвходовых элементов. При этом допускается не хранить диагональные элементы (для ЗУ 2 и 3) и использовать лишь верхнюю треугольную подматрицу (для ЗУ 4) ввиду симметричности бинарного отношения параллельности.

Оценка выигрыша во времени, составляющего как минимум 1–2 порядка при обработке разряженных матриц бинарных отношений по сравнению с высоко оптимизированной высокоуровневой [19], SIMD-ориентированной или CUDA-ориентированной [20, 21] программной реализаций, подробно будет рассмотрена в других работах. Немаловажной является оценка аппаратной сложности, которая может быть выполнена как в контексте сравнения с современными вычислительными средствами с универсальной архитектурой (CPU, GPU), так и с известными матричными устройствами (например, [22]). Оценку аппаратной сложности будем производить в эквивалентных вентилях (ЭВ) с целью абстрагироваться от деталей заказной или ПЛИС-реализации устройства, понимая под эквивалентным вентилем одно- или двухвходовой логический элемент, выполняющий элементарную логическую операцию (И, ИЛИ, НЕ и т.д.). В таком случае N-входовой логический элемент имеет аппаратную сложность $N-1$ ЭВ, D-триггер – 4 ЭВ, элемент задержки – 2 ЭВ, N-разрядный регистр – $4N$.

Аппаратная сложность предложенного устройства складывается из сложности ЗУ и сложности обрабатывающей логики в его составе.

Ячейка ЗУ, используемая для хранения битовых признаков бинарных отношений, в общем случае включает в себя элементы, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Элементы ячеек ЗУ и их аппаратная сложность

Элемент	Аппаратная сложность, ЭВ
И 1	2
ТТ 2	4
И 3_i	2
ИЛИ 4_i	1

Совокупная аппаратная сложность ячейки ЗУ может быть определена как

$$R_{ЯЗУ} = \underbrace{2}_{И1}\alpha + \underbrace{4}_{ТТ2} + K\left(\underbrace{2}_{И3_i} + \underbrace{1}_{ИЛИ4_i}\right) =$$

$$= 2\alpha + 3K + 4, \qquad (1)$$

где $\alpha \in \{0,1\}$ – битовый признак необходимости записи с использованием двухкоординатной адресации;

K – число портов чтения.

Отталкиваясь от формулы (1), характеризующей сложность ячейки ЗУ в общем виде, можно определить сложность ячеек ЗУ, хранящих значения бинарных отношений, в соответствии со спецификой выполняемых преобразований (табл. 2).

Таблица 2

Оценка аппаратной сложности ячеек ЗУ, хранящих битовые признаки бинарных отношений

Отношение	α	K	Аппаратная сложность, ЭВ
Следования	1	3	15
Связи	0	1	7
Параллельности	0	1	7
Альтернативы	1	0	6

С учетом приведенных в таблице 2 сложностей ячеек можно оценить сложность ЗУ в целом. В его состав входит N^2 ячеек и группа из K N-входовых элементов ИЛИ, используемых при чтении данных с использованием портов чтения.

Соответственно, сложность ЗУ в общем случае определяется как

$$R_{ЗУ} = \underbrace{N^2 R_{ЯЗУ}}_{ячейки} + \underbrace{K(N-1)}_{ИЛИ}. \qquad (2)$$

При хранении бинарных отношений, обладающих свойством симметричности (связь, параллельность и альтернатива), можно ограничиться хранением только верхней треугольной подматрицы, а соответствующая аппаратная сложность может быть определена как

$$R_{ЗУ2} = \underbrace{\frac{N(N-1)}{2} R_{ЯЗУ}}_{ячейки} + \underbrace{K(N-1)}_{ИЛИ}. \qquad (3)$$

С использованием данных таблицы 2 и формул (2) и (3) можно оценить сложности запоминающих устройств для хранения битовых признаков бинарных отношений (табл. 3).

Таблица 3

Аппаратная сложность ЗУ для хранения битовых признаков бинарных отношений

Отношение	Аппаратная сложность, ЭВ
Следования	$R_{ЗУ_\nu} = 15N^2 + 3N - 3$
Связи	$R_{ЗУ_\varphi} = \frac{7}{2}N^2 - \frac{5}{2}N - 1$
Параллельности	$R_{ЗУ_\omega} = \frac{7}{2}N^2 - \frac{5}{2}N - 1$
Альтернативы	$R_{ЗУ_\psi} = 3N^2 - 3N$

С учетом приведенных в таблице 3 формул можно определить интегральную аппаратную сложность памяти разработанного устройства:

$$R_{RAM} = R_{ЗУ_\nu} + R_{ЗУ_\varphi} + R_{ЗУ_\psi} + R_{ЗУ_\omega} =$$

$$= 25N^2 - 5N - 5. \qquad (4)$$

Операционная часть устройства (см. рис. 1) представлена схемами умножения

битовых векторов, транзитивного замыкания отношения (умножения битовых матриц) и матрицами элементов ИЛИ и И. Ее аппаратная сложность может быть определена как

$$R_{ОР} = R_{СБУ} + R_{СТЗ} + R_{ИЛИ} + R_{И}. \quad (5)$$

В состав схемы умножения битовых векторов (см. рис. 4) входят элементы, представленные в таблице 4, не считая матричного ЗУ, сложность которого вычислена выше, и устройства управления.

Таблица 4

Оценка аппаратной сложности схемы умножения битовых векторов

Элемент	Аппаратная сложность, ЭВ
НЕ 1	1
Рг 2	$4(N+1)$
Коммутатор 4	3
ТТ 5	4
И 6	1
ИЛИ 7	1
И 8	1
Элемент задержки 9	2
ИЛИ 10	1

Таким образом,

$$R_{СБУ} = 1 + 4(N+1) + 3 + 4 + \\ + 1 + 1 + 1 + 2 + 1 = 4N + 14 \text{ ЭВ}. \quad (6)$$

В состав схемы умножения битовых матриц (см. рис. 5) входят элементы, представленные в таблице 5.

Таким образом,

$$R_{СТЗ} = 1 + 4(N+1) + 4(N+1) + \\ + 2 + 1 + 1 + 2 = 8N + 15 \text{ ЭВ}. \quad (7)$$

Каждая из матриц элементов ИЛИ и И представляет собой верхнюю треугольную подматрицу из

$$1 + 2 + ... + (N-1) = \frac{N(N-1)}{2}$$

двухвходовых элементов.

Следовательно,

$$R_{ИЛИ} = R_{И} = \frac{N(N-1)}{2} \text{ ЭВ}. \quad (8)$$

Таким образом, интегральная аппаратная сложность операционной части устройства может быть определена как

$$R_{ОР} = \underbrace{4N+14}_{СБУ} + \underbrace{8N+15}_{СТЗ} + \underbrace{2 \cdot \frac{N(N-1)}{2}}_{И,\,ИЛИ} = \\ = N^2 + 11N + 29 \text{ ЭВ}. \quad (9)$$

Таблица 5

Оценка аппаратной сложности схемы умножения бинарных матриц

Элемент	Аппаратная сложность, ЭВ
НЕ 1	1
Рг 2	$4(N+1)$
Рг 3	$4(N+1)$
Элемент задержки 4	2
И 6	1
И 7	1
Элемент задержки 8	2

Зная аппаратную сложность памяти (4) и операционной части (9), можно вычислить аппаратную сложность устройства в целом (табл. 6):

$$R = \underbrace{25N^2 - 5N - 5}_{RAM} + \underbrace{N^2 + 11N + 29}_{ОР} = \\ = 26N^2 + 6N + 24 \text{ ЭВ}. \quad (10)$$

Представленные данные показывают, что аппаратные затраты растут квадратично с ростом размерности задачи N, причем основной вклад $(\approx 96\%)$ в них вносят матричные ЗУ для хранения битовых признаков. На современном уровне развития схемотехники с использованием ПЛИС возможно создание схем, включающих в своем составе десятки миллионов ЭВ, что делает возможным реализацию указанного устройства с возможностью обработки матриц с $N \approx 4096$. Микро-

схемы в заказном исполнении сегодня включают в своем составе миллиарды транзисторов, соответственно с их использованием возможна реализация устройства с возможностью обработки матриц с $N \approx 8192$.

Таблица 6

Аппаратная сложность устройства в зависимости от размера входных матриц N

N	R_{RAM}, ЭВ	R_{OP}, ЭВ	R, ЭВ
128	$4{,}1 \cdot 10^5$	$1{,}8 \cdot 10^4$	$4{,}3 \cdot 10^5$
256	$1{,}6 \cdot 10^6$	$6{,}8 \cdot 10^4$	$1{,}7 \cdot 10^6$
512	$6{,}6 \cdot 10^6$	$2{,}8 \cdot 10^5$	$6{,}8 \cdot 10^6$
1024	$2{,}6 \cdot 10^7$	$1{,}1 \cdot 10^6$	$2{,}7 \cdot 10^7$
2048	$1{,}1 \cdot 10^8$	$4{,}2 \cdot 10^6$	$1{,}2 \cdot 10^8$
4096	$4{,}2 \cdot 10^8$	$1{,}7 \cdot 10^7$	$4{,}4 \cdot 10^8$
8192	$1{,}7 \cdot 10^9$	$6{,}7 \cdot 10^7$	$1{,}8 \cdot 10^9$

Сопоставляя аппаратную сложность операционной части разработанного устройства с известными устройствами на базе систолических матричных структур [25], можно сделать вывод, что она в

$$\eta_R = \frac{6N^3 + 24N^2 - 2N}{26N^2 + 6N + 24} \approx 0{,}04N + 1 \quad (11)$$

раз меньше (например, при $N = 1024$ $\eta_R \approx 45$ раз).

Список литературы

1. Организация и синтез микропрограммных мультимикроконтроллеров / И.В. Зотов, В.А. Колосков, В.С. Титов [и др.]. – Курск: ГУИПП «Курск», 1999. – 368 с.

2. Емельянов С.Г., Зотов И.В., Титов В.С. Архитектура параллельных логических мультиконтроллеров. – М: Высшая школа, 2009. – 233 с.

3. Комбинаторно-логические задачи синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления при проектировании логических мультиконтроллеров / Э.И. Ватутин, И.В. Зотов, В.С. Титов [и др.]; Курск. гос. техн. ун-т. – Курск, 2010. – 200 с.

4. Ватутин Э.И. Проектирование логических мультиконтроллеров // Синтез разбиений параллельных граф-схем алгоритмов. – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011. – 292 с.

5. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.

6. Ватутин Э.И. Определение степени параллелизма параллельной граф-схемы алгоритма // Интеллектуальные и информационные системы (Интеллект–2009). – Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. – С. 24–26.

7. Ватутин Э.И., Зотов И.В., Титов В.С. Алгоритм и устройство выявления изоморфных вхождений *R*-выражений при построении множества сечений параллельных алгоритмов логического управления // Известия вузов. Серия: Приборостроение. – 2009. – Т. 52, № 2. – С. 37–45.

8. Ватутин Э.И., Зотов И.В., Титов В.С. Выявление изоморфных вхождений R-выражений при построении множества сечений параллельных алгоритмов логического управления // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. – Т. 7, № 11. – С. 49–56.

9. Ватутин Э.И. Интересные свойства *R*-выражений в задаче синтеза разбиений параллельных алгоритмов управления // Молодежь и XXI век: тезисы докладов XXXVI межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов в области научных исследований / Курск. гос. техн. ун-т. – Курск, 2008. – Ч. 1. – С. 30–31.

10. Ватутин Э.И., Зотов И.В. Аппаратная модель для определения минимального числа блоков при декомпозиции параллельных алгоритмов логического управления // Известия вузов. Серия: Приборостроение. – 2008. – Т. 51, № 2. – С. 39–43.

11. Ватутин Э.И. Проблема оценки интенсивности межблочного взаимодей-

ствия в задаче нахождения субоптимальных разбиений параллельных управляющих алгоритмов // Образование, наука, производство: III международный студенческий фестиваль. – Белгород, 2006.

12. Ватутин Э.И., Зотов И.В. Построение матрицы отношений в задаче оптимального разбиения параллельных управляющих алгоритмов // Известия Курского государственного технического университета. – 2004. – № 2. – С. 85–89.

13. Ватутин Э.И. Анализ узких мест программной реализации метода параллельно-последовательной декомпозиции граф-схем параллельных алгоритмов // Распознавание – 2013 / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2013. – С. 235–237.

14. Мартынов И.А., Ватутин Э.И., Титов В.С. Многопортовое матричное запоминающее устройство для хранения битовых признаков // Медико-экологические информационные технологии – 2014 / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2014. – С. 141–145.

15. Martynov I.A., Vatutin E.I., Titov V.S. Hardware oriented classification of binary relations of graph-schemes of parallel algorithms // Eighth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation (WCIS – 2014). – Tashkent, 2014. – P. 70–73.

16. Наджаджра М.Х., Мартынов И.А., Ватутин Э.И. Схемотехническая реализация операции умножения битовых векторов при классификации бинарных отношений граф-схем параллельных алгоритмов // Распознавание – 2015 / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2015. – С. 275–277.

17. Мартынов И.А., Ватутин Э.И., Титов В.С. Аппаратно-ориентированная реализация операции транзитивного замыкания бинарных отношений // Распознавание – 2015 / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2015. – С. 244–247.

18. Ватутин Э.И. Однородная среда электронной модели дерева для аппаратно-ориентированной обработки R-выражений // Распознавание – 2008 / Курск. гос. техн. ун-т. – Курск, 2008. – Ч. 1. – С. 90–92.

19. Ватутин Э.И., Мартынов И.А., Титов В.С. Оценка реальной производительности современных процессоров в задаче умножения матриц для однопоточной программной реализации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2013. – № 4. – С. 11–20.

20. Ватутин Э.И., Мартынов И.А., Титов В.С. Оценка реальной производительности современных процессоров и видеокарт с поддержкой технологии CUDA в задаче умножения матриц // CUDA: альманах (май 2015). – 2015. – С. 9–10.

21. Ватутин Э.И., Мартынов И.А., Титов В.С. Оценка реальной производительности современных видеокарт с поддержкой технологии CUDA в задаче умножения матриц // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2014. – № 2. – С. 8–17.

22. А. с. 1534471 СССР, МПК G06F17/16. Устройство для умножения ленточной матрицы на полную матрицу / Кричмара А.А., Сердцев А.А., Романовский П.Г. Заявл. 15.01.1988; опубл. 07.01.1990.

Получено 19.06.15

I.A. Martynov, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: morzee@inbox.ru)

HARDWARE COMPLEXITY ESTIMATION OF ACCELERATOR FOR FAST DETERMINING OF VERTICES BINARY RELATIONS OF PARALLEL ALGORITHMS GRAPH-SCHEMES

The article considers the problem of hardware-oriented classification of binary relations of vertexes of the graph-schemes of parallel algorithms that arises in the design of logic control systems within the logic multicontrollers basis and automated parallelization. Software implementation of these actions is relatively slow, which is why in order

to reduce the time required to perform the classification of relationships developed to perform with the use of specialized hardware-based accelerator. This article contains a brief description of its structure, based on the use of a dedicated multi-port memory with a matrix structure, and specialized circuitry implementing multiplication of bit vectors. In the course of assessing the hardware complexity was showed that the proposed device at least 1 orders of magnitude easier comparing to well known systolic multiprocessors with matrix structure.

***Key words**: classification of binary relations, matrices multiplication, special computing devices design, graph-schemes of parallel algorithms.*

УДК 681.391+511.9+519.612

В.С. Усатюк, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail:L @Lcrypto.com)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОДОВОГО РАССТОЯНИЯ НЕДВОИЧНОГО LDPC-КОДА БЛОЧНЫМ МЕТОДОМ КОРКИНА-ЗОЛОТАРЕВА

В данной работе методы геометрии чисел: блочный метод Коркина-Золотарева (приведение базиса решетки) и метод Каннана-Финке-Поста (поиск кратчайшего вектора), были применены для решения задач оценки кодовых расстояний помехоустойчивых линейных блочных кодов. В работе предложен метод для оценки кодовых расстояний тернарных кодов GF(3) с целью выбора наилучших LDPC-кодов для их отображений на гексагональное созвездие. Этот метод также применим для оценки кодовых расстояний двоичных образов недвоичных GF(64) LDPC-кодов с целью выбора кода для двоичной и квадратурной фазовых модуляций (BPSK, QPSK), применяемых при оптической передаче информации и в архивной голографической памяти. В работе получена верхняя оценка константы масштабирующего коэффициэнта в случае приведения базиса блочным методом Коркина-Золотарева с размером блока β *.*

***Ключевые слова**: кодовое расстояние, LDPC-код, приведение базиса решетки, целочисленные решетки, поиск кратчайшего базиса, поиск кратчайшего вектора, блочный метод Коркина-Золотарева.*

***

Введение

Впервые двоичные LDPC-коды были предложены Робертом Галлагером в его докторской диссертации (1963 г.) [1]. Однако эти результаты на протяжении более 30 лет были проигнорированы. Причинами этого являлись отсутствие строгих аналитических методов поиска хороших LDPC-кодов и сравнительно высокая сложность алгоритмов их декодирования.

Первый алгебраический метод построения двоичных LDPC-кодов был предложен Маргулисом [2]. Однако из-за псевдокодовых слов минимального веса, обусловленных пересечениями циклов графа при декодировании методом распространения доверия, фактическое кодовое расстояние получилось равное 24 вместо теоретически предсказанного 220 [3]. Код Маргулиса продемонстрировал слабость существующих в то время алгебраических методов помехоустойчивого кодирования при решении задач построения кодов для мягкого декодирования методом распространения доверия.

Более поздняя работа Таннера продемонстрировала новый теоретико-графический подход и связь двух ключевых параметров LDPC-кодов, кодового расстояния и обхвата графа [4]. Осмысление работы Таннера привело к возникновению широкого класса алгебраических методов построения LDPC-кодов.

Были предложены: евклидово и проективно-геометрические LDPC-коды (EG/PG, [5]); LDPC-коды на словах Рида-Соломона (RS-LDPC, [6]); коды на блочных неполных дизайнах (BIBD [7]) и других структурах инцидентности, принадлежащих классу графов Рамануджана [8].

Ключевым достоинством алгебраических методов является их конструктивная природа, знание кодового расстояния, обхвата, скорости кода, автоморфизма графа и других свойств. Главным недостатком алгебраических методов является сложность изменения их параметров, не допускающая получения кодов с гибким диапазоном скоростей, длин, строчных и столбчатых весов, с увеличенным обхватом графа без использования масок.

По этой причине параллельно с алгебраическими методами бурно развивались случайные методы построения кодов на графах: Guess-and-test ([9]), Bit-Filing ([10]), PEG ([11]), Hill-climbing ([12]). Однако все они требуют оценки ключевых параметров кода, в частности кодового расстояния.

Недвоичные LDPC-коды впервые были предложены в работе Д. Маккея, М. Дэви ([13]). Маккеем был предложен эвристический метод построения таких кодов при помощи энтропии синдрома [14]. В работах Фоссорье и Деклерка был изложен метод оптимизации назначения недвоичного значения через оптимизацию спектра строчных кодов и разрыв циклов [15].

Значительный энергетический выигрыш помехоустойчивые коды обеспечивают при их согласовании с методами модуляции. В работе К.Ш. Зигангирова, К. Енгдала был продемонстрирован энергетический выигрыш в случае применения гексагонального созвездия (пять трит, 3^5=243) в сравнении с прямоугольной многоуровневой квадратурной модуляцией (восемь бит, 2^8=256, QAM-256) [16]. В работе была продемонстрирована эффективность использования геометрических решеток (Lattice)-наиплотнейших упаковок в качестве модуляционных созвездий, обусловливающих выигрыш за счет формы созвездия («shape gain»), ранее описанный в пионерских работах Вея-Форни [17], Полтырева [18], Де Будде [19] и Урбанке [20].

Для согласования созвездия и кода требуется получение тернарных кодов с наибольшим кодовым расстоянием. Существуют методы построения совершенных тернарных кодов ([20]), однако для случая произвольного тернарного кода, даже для малых длин, задача не была решена, в том числе и числеными методами поиска кодового расстояния [21].

В данной работе предлагается метод определения кодового расстояния тернарного LDPC-кода с помощью блочного метода Коркина-Золотарева. В отличие от импульсного метода К. Берроу [22] и метода Фоссорье-Ху-Эльфеора [23] поиска слов малого веса методом распространения доверия, применимого к кодам, допускающим мягкое декодирование: турбо-коду и LDPC-кодам, предложенный метод применим к произвольному линейному двоичному и тернарному кодам. Кроме того, метод дает оценку истинного кодового расстояния, а не оценку веса псевдокодового слова.

Согласование прямоугольной модуляции [24] с недвоичным кодом также позволяет получить дополнительный энергетический выигрыш. По этой причине предложенный метод модифицируется для оценки кодового расстояния двоичного образа недвоичного GF(q) LDPC-кода (q>3) в случае использования двоичной и квадратурной фазовых модуляций (BPSK , QPSK) [25].

1. Основные понятия и обозначения

Определение 1. Решетка – дискретная абелева подгруппа, заданная в пространстве R^n.

Пусть базис $B = \{b_1, ..., b_n\}$ задан линейно-независимыми векторами в R^m.

Тогда под решеткой будем понимать множество целочисленных линейных комбинаций этих векторов:

$$L(b_1, ..., b_n) = \{\sum_{i=1}^{n} x_i b_i : (x_1, ..., x_n) \in Z^n\},$$

где m и n – размерность и ранг решетки соответственно, $m \geq n$.

Определение 2. Задача поиска короткого вектора (Δ-short vector problem, $SVP_\Delta(m)$). Пусть дана m-мерная решетка $L(B)$ ранга n и вещественное $\Delta > 1$. Найти нетривиальный вектор, в Δ раз больший кратчайшего вектора в решетке:

$$\bar{b} \in L : \left\|\bar{b}\right\| \leq \Delta \cdot \lambda_1(L).$$

При $\Delta = 1$ решается задача поиска кратчайшего вектора в решетке, при $\Delta > 1$ – короткого вектора.

Определение 3. Задача поиска короткого базиса решетки (Δ-short basis problem, $SBP_{\Delta}(m)$). Пусть дан базис полной решетки B и вещественное $\Delta > 1$.

Найти базис

$$B' = \{b_1', b_2', ..., b_m'\} : L(B) = L(B'),$$
$$\prod_{i=1}^{m} \|b_i'\| \le \Delta \cdot \prod_{i=1}^{m} \|b_i^{\perp}\|.$$

Подробнее методы геометрии чисел (алгоритм поиска короткого базиса решетки (блочный метод Коркина-Золотарева) и алгоритм поиска кратчайшего вектора) рассмотрены в работах [26].

Определение 4. Линейный код длины n и ранга k является линейным подпространством C размерности k пространства F_q^n, где F_q – конечное поле из q элементов (символов).

Определение 5. Линейный блоковый код – такой код, что множество его кодовых слов образует k-мерное линейное подпространство C в n-мерном линейном пространстве, изоморфное пространству k-символьных векторов.

Операция кодирования осуществляется умножением исходного k-символьного вектора на невырожденую матрицу G, называемую порождающей матрицей линейного блочного кода.

В данной статье мы будем расматривать линейные блоковые тернарные LDPC-коды (q=3) и двоичные образы 64-арного LPDC-кода.

Определение 6. Расстоянием Хемминга между двумя словами $\overline{v}_1$ и $\overline{v}_2$ называется количеством символов, в которых слова различаются.

Определение 7. Минимальное расстояние $d_{\min}$ линейного кода является минимальным из всех расстояний Хемминга всех пар кодовых слов.

Определение 8. Вес кодового слова ω равен расстоянию Хемминга между этим кодовым словом и нулевым кодовым словом. Вес ω определяется как число ненулевых компонент кодового слова.

Определение 9. Весовой спектр кода это вектор $\omega(C) = (w_0, w_1, w_2, ..., w_i, ..., w_n)$, где w_i – количество кодовых слов веса i.

Определение 10. Двудольный граф Таннера – это граф, множество вершин которого можно разбить на две части, соответствующие символьным и проверочным узлам, таким образом, что каждое ребро графа соединяет какую-то вершину из одной части с какой-то вершиной другой части. Не существует ребра, соединяющего две вершины из одной и той же части.

Определение 11. Обхват графа – длина наименьшего цикла, содержащегося в данном графе.

Определение 12. Величина автоморфизма графа – число различных нетривиальных изоморфизмов графа на себя, отображений, сохраняющих отношение смежности между вершинами графа.

Определение 13. Базис $B = \{b_1, b_2, \ldots, b_m\}$ решётки $L \subset R^m$ приведён по длине, если в результате ортогонализации решетки методом Грамма-Шмидта выполняется следующее неравенство:

$$|\mu_{i,j}| \le \frac{1}{2}, 1 \le j < i \le m,$$

где $\mu_{i,j}$ – коэффициенты Грамма-Шмидта.

Определение 14. Упорядоченный по длине базис $B = \{b_1, b_2, \ldots, b_m\}$ решётки $L \subset R^m$ приведён блочным методом Коркина-Золотарева с блоком $\beta \in [2, m]$ и точностью $\delta \in \left(\frac{1}{2}; 1\right]$, если:

– базис B приведён по длине;

– $\delta^2 \cdot \|b_i^{\perp}\|^2 \le \lambda_1^2(L_i), i = 1, \ldots, m,$

где $\lambda_1(L_i)$ –длина кратчайшего вектора в решётке L_i, образованной ортого-

нальным дополнением векторного пространства с базисом $b_i,\ldots,b_{\min(i+\beta-1,m)}$.

Определение 15. Базис решетки приведен по Ленстра-Ленстра-Ловасу (LLL-алгоритмом), если он приведен блочным методом Коркина-Золотарева с размером блока $\beta=2$ и точностью ортогонализации $\delta\in\left(\frac{1}{2};1\right)$.

2. Метод определения кодового расстояния линейного блочного кода с использованием блочного метода Коркина-Золотарева

Для определения кодового расстояния нам необходимо найти в коде слова малого веса. С этой целью нам необходимо вложить код в решетку – отмасштабировать $n-k$ подпространств базиса решетки B_c некоторой константой N такой, чтобы расстояние Хэмминга между кодовыми словами отобразилось в евклидово расстояния между векторами кодовых слов решетки. Легко убедиться, что полученная решетка – вырожденная, ранга $rank(B_c)=k$.

Осуществив поиск короткого базиса решетки методом Коркина-Золотарева, получим некоторый набор векторов малого веса с нормой $r_{\max}$. Вектор решетки с наименьшей нормой соответствует предполагаемому кратчайшему вектору. Однако пока мы не осуществим перебор всех линейных комбинаций методом Каннана-Финке-Поста и не убедимся, что полученная норма вектора является наименьшей возможной в решетке, данное кодовое слово будем считать словом малого веса.

Оценим масштабирующий коэффициент N, необходимый для корректной работы метода.

Теорема 1. Базис решетки $L(B_c)$ несистематического кода, δ-приведённый по Ленстра-Ленстра-Ловасу, в качестве приведенных коротких базисных векторов решетки будет давать слова малого веса несистематического кода, если константа.

$$N\geq\left(\frac{4}{4\delta-1}\right)^{n/2}\times 2\sqrt{(m+1)(n+1)}\cdot r_{\max}\cdot M^m,$$

где $M=\max\{\|A_0\|,\|A_1\|,\ldots,\|A_{n-1}\|,\|d\|\}$ эквивалентного линейного диофантова уравнения $A\times x=d$.

Доказательство теоремы приведено в работе [27, с. 594-596]. Оценим N в случае приведения базиса блочным методом Коркина-Золотарева с размером блока β.

Теорема 2. Базис решетки $L(B_c)$ несистематического кода, приведённый блочным методом Коркина-Золотарева с размером блока β, в качестве приведенных коротких базисных векторов решетки будет давать слова малого веса несистематического кода, если константа

$$N\geq\gamma_\beta^{\frac{n-1}{\beta-1}}\times 2\sqrt{(m+1)(n+1)}\times r_{\max}\times M^m.$$

Доказательство

Первая часть доказательства берется из доказательства теоремы 1. Длина векторов, образующих избыточности в исходном коде, ограничена сверху величиной

$$\|V_i\|\leq 2\sqrt{(n+1)(m+1)}\cdot r_{\max}\cdot M^m,\quad 0\leq i\leq n-k.$$

Для доказательства оставшейся части нам необходимо оценить сверху длину векторов избыточности решетки после приведения ее базиса блочным методом Коркина-Золотарева с размером блока β, $\overline{b_i}\in L':0\leq i\leq n-k$.

В работе [28] Шнор доказал, что длина приведенных векторов ограничена сверху величиной

$$\|b_i\|^2\leq\gamma_\beta^{2\frac{n-1}{\beta-1}}\frac{i+3}{4}\lambda_i^2,$$

где γ_β – константа Эрмита;

λ_i – i-соответствующий минимум решетки.

Подстановкой получим искомую оценку.

В случае систематической порождающей матрицы кода легко убедиться, что константа $N = 1$.

Предлагаемый метод поиска кодовых слов минимального веса требует построения решетки на основе порождающей матрицы систематического кода $G = (I_k \mid A), A \in F_q^{k \times n-k}$:

$$B_c = \begin{pmatrix} A^T & qI_{n-k} \\ I_k & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

В случае несистематического кода

$$B_c = \begin{pmatrix} N \cdot G' & N \cdot qI_{n-k} \\ I_k & 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где G' – порождающая матрица несистематического кода;

q – количество символов;

I_k – единичная матрица [31].

После чего в решетке ищется вектор $\|v\|_\infty = 1, v \in L, rank(L) = n$ с минимальным числом отличных от нуля координатных компонент. Переход от метрики Евклида к метрике Чебышева дает нам эквивалентную формулировку задачи поиска слов минимального веса в случае решетки, а именно поиск среди точек решетки, образованных различными 2^n шарами с центрами $\left(\pm\frac{d}{2},...,\pm\frac{d}{2}\right)$ и радиусами $\frac{d}{2}\sqrt{n}$ [29]. Кодовые слова двоичного $q = 2$, $-1 \equiv 1 \bmod 2$ и троичного кодов $q = 3, -1 \equiv 2 \bmod 3$ будут представлены векторами решетки с координатными компонентами, принимающими значения из множества $\{-1, 0, 1\}$.

Формальное описание метода представлено ниже в виде алгоритма:

Вход алгоритма: порождающая матрица кода, вложенная в решетку $L \in R^{m+n+1}$ ранга $rank(L) = n+1$ с базисом, заданным формулами (1) и (2), в случае систематического и несистематического кода соответственно.

1. Приведем решетку блочным методом Коркина-Золотарева с размером блока β.

2. После удаления линейно зависимых строк и столбцов получим некоторый короткий базис решетки $\bar{b}_0, \bar{b}_1, ..., \bar{b}_{n-m} \in R^{n+1}$, $rank(L(b_0, b_1, ..., b_{n-m})) = n - m + 1$. В случае, если среди получившихся коротких векторов будет вектор нормы меньше изначальной оценки, примем длину полученного вектора, соответсвующего некоторому слову малого веса, за новую оценку с целью уменьшения дерева перебора.

3. Ортогонализуем полученный базис методом Грамма-Шмидта, получим ортогональное дополнение пространства решетки $\bar{b}_0^\perp, \bar{b}_1^\perp, ..., \bar{b}_{n-m}$ и коэффициенты Грамма-Шмидта μ_{ij};

4. Выполним полным перебором поиск кратчайшего вектора $\bar{v} \in Z^{n+1} : -r_{\max} \le v_i \le -r_{\max}, i = 0...n$ (алгоритм Каннана-Финке-Поста) в решетки с начальной нормой $A = (n+1) \times r_{\max}^2$.

На выходе алгоритма получается кодовое слово минимального веса Хэмминга.

На шаге 3 с целью распараллеливания метода ортогонализации можно применить преобразование Хаусхолдера [26]. Шаг 4 распараллеливается аналогичным способом.

Рассмотрим работу алгоритма на примере тернарного совершенного кода Голея (11,6) с порождающей матрицей:

$$G = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 2 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 1 & 2 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Решетка для поиска минимального расстояния в случае приведения блочным методом Коркина-Золотарева с размером блока $\beta = 2$ и N=6 примет следующий вид:

$$B_c^T = \begin{pmatrix}
12 & 12 & 6 & 12 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 12 & 12 & 6 & 12 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 12 & 12 & 6 & 12 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 12 & 12 & 6 & 12 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 12 & 6 & 12 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 12 & 6 & 12 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{pmatrix}.$$

После приведения базиса решетки получим

$$B_c = \begin{pmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 \\
6 & 6 & 6 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 6 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
6 & 0 & 0 & -6 & 0 & -6 & 0 & 0 & -6 & 6 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 0 \\
0 & 6 & 6 & 6 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 6 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
6 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 6 & 0 & 6 & 6 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
6 & 6 & 0 & -6 & -6 & 0 & 0 & -6 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -6 & 0 & 6 & 0 & 6 & -6 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 1 \\
0 & -6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 6 & -6 & 6 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\
-6 & 0 & -6 & -6 & -6 & 0 & 0 & 0 & -6 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -6 & 0 & -6 & -6 & -6 & 0 & 0 & 0 & -6 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 \\
0 & 0 & 0 & -6 & 0 & 0 & -6 & 0 & -6 & -6 & -6 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\
0 & 0 & -6 & 0 & 0 & -6 & 0 & -6 & -6 & -6 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0
\end{pmatrix}.$$

Отбрасываем первые 6 строк и последние 6 столбцов как вспомогательные координатные компоненты (подпространство векторов избыточности кода) и отмасштабируем значения координатных компонент в решетке.

Получим базис решетки, дающий некоторое слово малого веса, которое может оказать словом наименьшего веса:

$$B_c = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

В качестве базиса решетки мы получили одиннадцать векторов, соответсвующих 11-ти кодовым словам веса 5. Вектору решетки в последней строке $v = (0,0,-1,0,0,-1,0,-1,-1,-1,0)$ соответствует кодовое слово $(0,0,2,0,0,2,0,2,2,2,0)$ веса 5. Для того чтобы убедиться, что не существуют слова меньшего веса, нам необходимо выполнить полный перебор среди всех возможных линейных комбинаций векторов решетки, отличающихся своими координатными компонентами. Запуск алгоритма Каннна-Финке-Поста показывает, что таковые векторы в решетке отсутствуют, $d_{\min} = 5$.

Корректность представленного алгоритма и программного комплекса, его осуществляющего, была проверена на более чем 30-ти различных кодах. Использовались полярные коды, коды Рида-Маллера, коды БЧХ, код Голея, турбокоды, LDPC-коды [30]. Например, для оценки кодового расстояния эквивалентной блочной матрицы турбо-кода [13] при однопоточной реализации метода на ЭВМ (Phenom x4-965/ 8 Gb DDR3) потребовалась 21 секунда, тогда как оценка кодового расстояния в GAP 4.7.8 (Guava 3.12, Sonata 2.6) требует более 648000 секунд. Однопоточная реализация предложеного метода доступна на сайте автора [31].

3. Результаты оценки кодового расстояния недвоичных LDPC-кодов с помощью предложенного метода

С использованием предложенного метода нами были построены 5 квазициклических (автоморфизм графа равен размеру циркулянта) регулярных тернарных LDPC-кодов с параметрами, приведенными в таблице 1.

Таблица 1

Кодовые растояния тернарных LDPC-кодов

Длина кода	Вес столбца	Вес строки	Циркулянт	Обхват	$d_{\min}$
300	3	6	50	8	59*
560	4	8	70	8	28
564	4	12	47	6	12
940	4	20	47	6	15
2400	4	40	60	6	12

Примечание. * – после исследования 178 из 300 измерений решетки.

Для построения оптимизированных кодов мы использовали 4 проверочных матрицы древоподобных кодов (с минимальным автоморфизмом графа), построенных Деклерком при помощи PEG-алгоритма [14, 32]. На основе метода назначения недвоичного значения на ребре [15] нами были построены три квазициклических кода. Результаты оценки кодового расстояния двоичных образов этих кодов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Кодовые растояние двоичных образов GF(64) LDPC-кодов

Длина кода	Вес столбца	Вес строки	Цирку-лянт	Об-хват	$d_{\min}$
52	2	4	-	12	6
64	2	8	-	8	4
210	2	20	-	6	4
820	2	40	-	6	4
212	2	4	53	12	6
240	3	6	40	8	9

Предложенный метод позволяет значительно увеличить длину LDPC-кода, для которого возможно точное определение кодового расстояния. Так, в представленной работе было определено кодовое расстояние для тернарного LDPC-кода длиной 2400 [2400,2160,12] (см. табл. 1), равное 12. Наибольшая длина LDPC-кода, для которого ранее определялось кодовое расстояние, равна 1369 [1369, 1224 ,10].

Заключение

В работе предложен метод для оценки кодовых расстояний тернарных кодов GF(3) и двоичных образов недвоичных LDPC-кодов. В работе получена верхняя оценка константы масштабирующего коэффициэнта в случае приведения базиса блочным методом Коркина-Золотарева с размером блока β. Предложенный метод позволяет значительно увеличить длину LDPC-кода, для которого возможно точное определение кодового расстояния.

Список литературы

1. Gallager R.G. Low-density parity-check codes: monograph. – Cambridge: MIT Press, 1963. – 88 p.

2. Margulis G.A. Explicit construction of graphs wihtout short circles and low-density codes // Combinatorica. – 1982. – Vol. 2. – P. 71–78.

3. D. MacKay J.C., Postol M.J. Weaknesses of Margulis and Ramanujan-Margulis Low-Density Parity-check codes // Proceedings of MFCSIT. – 2002.

4. Tanner R.M. A recursive approach to low complexity codes // IEEE Trans. Inform. Theory. – 1981. – Vol. 27, №5. – P. 533-547.

5. Kou Y., Lin S., Fossorier M.P.C Low-density parity-check codes based on finite geometries: a rediscovery and new results // IEEE ISIT. – 2001. – Vol. 47, № 7. – P. 2711-2736.

6. Djurdjevic I., Abdel-Ghaffa Xu K., Lin S. A class of low-density parity-check codes constructed based on Reed-Solomon codes with two information symbols // IEEE Comm. Lett. – 2003. – Vol. 7. – P. 317-319.

7. New constructions of quasi-cyclic LDPC codes based on special classes of BIBD's for the AWGN and binary erasure channels / L. Lan, Y.Y. Tai, S. Lin, V. Behshad, B. Honary // IEEE Trans. Comm. – 2008. – Vol. 56, №1. – P. 39-48.

8. T. Høholdt, H. Janwa. Optimal Bipartite Ramanujan Graphs from Balanced Incomplete Block Designs: Their Characterizations and Applications to Expander\LDPC Codes // Proceeding AAECC-18. – 2009. – P. 53-64.

9. Fossorier M. Quasi-cyclic low-density parity-check codes from circulant permutation matrices // IEEE Trans. Inform. – 2004. – Vol. 50, № 8. – P. 1788-1793.

10. Campello J., Modha D.S., Rajagopalan S. Designing LDPC codes using

bit-filling // IEEE Comm. – 2001.– Vol. 1.– P. 55-59.

11. Hu Y., Eleftheriou E., Arnold D.M. Regular and Irregular Progressive Edge Growth Tanner Graphs // IEEE Trans. on Inform. Theory. – 2005. – Vol. 51, № 1. – P. 386-398.

12. Wang Y., Yedidia J.S., Draper S.C. Construction of high girth QC-LDPC codes // Trans. Intern. Symp. on Turbo Codes. – 2008. – P. 180–185.

13. Davey M., MacKay D.J.C. Low density parity codes over GF(q) // IEEE Comm. letter.– 1998. – Vol. 2.– P. 165–167.

14. MacKay D. Optimizing Sparse Graph Codes over GF(q) [Electronic resource]. – URL: http://www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/CodesGallager.html, August 2015.

15. Poulliat C., Fossorier M., Declercq D. Design of regular (2,d/sub c/)-LDPC codes over GF(q) using their binary images // IEEE Comm. – 2008. – Vol. 56, № 10. – P. 1626-1635.

16. Енгдал К., Зигангиров К.Ш. Сравнительный анализ гексагональной многоуровневой квадратурной амплитудной модуляции и прямоугольной многоуровневой квадратурной амплитудной модуляции // Пробл. передачи информ. – 1998. – 34(4). – С. 39–50.

17. Forney G.D. Multidimensional constellations. I. Introduction, figures of merit, and generalized cross constellations // IEEE SAC. – 1989. – Vol. 7, № 6. – P. 877-892.

18. Poltyrev G. On coding without restrictions for the AWGN channel // IEEE Trans. Inform. Theory. – 1994. –Vol. 40, № 2. – P. 409–417.

19. Buda R. Some optimal codes have structure // IEEE Jour. on SAC. – 1989. – Vol. 7, № 6. – P. 893-899.

20. Urbanke R., Rimoldi B. Lattice codes can achieve capacity on the AWGN channel //IEEE Trans. Inform. Theory. – 1998. – Vol. 44, № 1. – P. 273-278.

21. Представление гексагональных созвездий с помощью графов Эйзенштейна–Якоби / К. Мартинес, Э. Стаффорд, Р. Байвиде, Э.М. Габидулин // Пробл. передачи информ. – 2008. – № 44 (1). – С. 3–14.

22. Markus G. Bounds on the minimum distance of linear codes and quantum codes [Electronic resource]. – URL: http://www.codetables.de, August 2015.

23. Berrou C.,Vaton S. Computing the minimum distances of linear codes by the error impulse method // IEEE. Inform. Theory. – 2002. – № 2. –P.1017-1020.

24. Егоров С.И., Конев А.А., Косилова И.Ю. Алгоритм и устройство последовательного декодирования LDPC-кодов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2014. – № 2. – С. 25–30.

25. Hu X., Fossorier M., Eleftheriou E. On the computation of the minimum distance of low-density parity-check codes // IEEE Comm. – 2004. – Vol. 2. – P. 767-771.

26. Performance comparison of non-binary LDPC block and spatially coupled codes / K. Huang, D. Mitchell, L. Wei, X. Ma, D.J. Costello // IEEE Trans. Inform. Theory. – 2014.– P. 876-880.

27. Кузьмин О.В., Усатюк В.С. Параллельные алгоритмы вычисления локальных минимумов целочисленных решеток // Программные продукты и системы. – 2015. – № 1. – С. 55-62.

28. Betten A., Braun M., Fripertinger H. Error-Correcting Linear Codes Classification by Isometry and Applications. – Berlin:Springer-Verlag, 2006. – 818 p.

29. Schnorr C.P. Block Reduced Lattice Bases and Successive Minima // Combinatorics, Probability and Computing.– 1994. – Vol. 3, № 4. – P. 507-522.

30. Ivanova V.S. Lattice Basis Reduction in Infinity Norm. – Darmstadt: Techn. Univer. Darmstadt, 2010. – 31 p.

31. Helmling M., Scholl S. Database of ML Simulation Results. Kaiserslautern Univer [Electronic resource]. – URL: http://www.uni-kl.de/channel-codes (дата обращения: 27.10.2010).

32. Усатюк В.С. Методы геометрии чисел. Архив ‘measure code distance.rar’ [Электронный ресурс]. – URL: http://www.lcrypto.com/lsolv (дата обращения: 27.10.2015).

33. Declercq D. Regular ultra-sparse graphs and related non-binary LDPC codes [Electronic resource]. – URL: http://perso-etis.ensea.fr/~declercq/graphs.php (дата обращения: 27.10.2015).

Получено 29.06.15

V.S. Usatjuk, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk) (e-mail:L @Lcrypto.com)

COMPUTING THE MINIMUM DISTANCE OF NONBINARY LDPC CODES USING BLOCK KORKIN-ZOLOTAREV METHOD

In article present measure code distance algorithm of binary and ternary linear block code using block Korkin-Zolotarev (BKZ). Proved the upper bound on scaling constant for measure code distance of non-systematic linear block code using BKZ-method for different value of the block size. Introduced method show linear decrease of runtime from number of threads and work especially good under not dense lattices of LDPC-code. These properties allow use this algorithm to measure the minimal distance of code with length several thousand. The algorithm can further improve by transform into probabilistic algorithm using lattice enumerating pruning techniques.

***Key words**: minimal distance, LDPC-code, lattice basis reduction, integer lattices, shortest vector problem, SVP, shortest basis problem, SBP, Block Korkin-Zolotarev reduction, BKZ.*

УДК 614.8:057.314(46.879):251.42

Н.М. Агарков, д-р мед. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: vitalaxen@mail.ru)

С.В. Иванов, д-р мед. наук, профессор, ГБОУ ВПО «Курский государственный медицинский университет» (e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

А.В. Голиков, канд.мед. наук, доцент, ГБОУ ВПО «Курский государственный медицинский университет» (e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

А.С. Климкин, аспирант, ГБОУ ВПО «Курский государственный медицинский университет» (e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДЕКСА ЧАРЛЬСОНА ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ БОЛЬНЫХ С МЕХАНИЧЕСКОЙ ЖЕЛТУХОЙ ЖЕЛЧНОКАМЕННОГО ГЕНЕЗА

Выполненная модификация индекса Чарльсона позволяет более объективно учитывать количественный вклад сопутствующих заболеваний и возраста в прогноз исходов лечения больных с механической желтухой желчнокаменного генеза. Полученные средние значения баллов по сопутствующим группам заболеваний и возрасту среди экспертов являются согласованными по величине коэффициента конкордации. Дискриминантный метод позволил классифицировать выделенные группы по изученным заболеваниям и возрасту с высокой безошибочной вероятностью.

***Ключевые слова**: дискриминантный метод, метод экспертной оценки Дельфи, индекс Чарльсона, желчнокаменная болезнь.*

***

Актуальность

Влияние коморбидной патологии на клинические проявления, диагностику, прогноз и лечение многих заболеваний многогранно и индивидуально. Взаимодействие различных заболеваний и возраста значительно изменяет клиническую картину и течение основной нозологии, характер и тяжесть осложнений, ухудшает качество жизни больного, ограничивает или затрудняет лечебно-диагностический процесс.

Коморбидность оказывает влияние на прогноз для жизни, увеличивает вероятность летального исхода. Наличие коморбидных заболеваний способствует увеличению койко-дней, инвалидизации, препятствует проведению реабилитации, увеличивает число осложнений после хирургических вмешательств.

Отсутствие единого комплексного научного подхода к оценке коморбидности влечет за собой различные пробелы в клинической практике. Наличие коморбидности следует учитывать при выборе алгоритма диагностики и схемы лечения той или иной болезни.

Среди существующих сегодня 12-ти общепризнанных методов измерения коморбидности наиболее распространен индекс Чарльсона, предложенный для оценки отдаленного прогноза лечения больных.

Данный индекс представляет собой балльную систему оценки (от 0 до 40) наличия определенных сопутствующих заболеваний и используется для прогноза летальности. При его расчете суммируются баллы, соответствующие сопутствующим заболеваниям, а также добавляется один балл на каждые десять лет жизни при превышении пациентом сорокалетнего возраста (т. е. 50 лет – 1 балл, 60 лет – 2 балла).

Однако индекс коморбидности Чарльсона имеет некоторые недостатки – при его расчете не учитывается наличие нарушений ритма сердца и выраженности хронической сердечной недостаточности, оценка возрастных показателей не всегда соответствует уровню выраженности ко-

морбидного фона. В связи с этим нами проведена модификация индекса Чарльсона с целью его оптимизации для оценки коморбидности.

Цель исследования: модификация индекса Чарльсона для дифференцированной хирургической тактики у больных механической желтухой (МЖ) неопухолевого генеза с учетом коморбидности и анатомических особенностей зоны больного сосочка двенадцатиперстной кишки (БСДК).

Материалы и методы исследования

Математическая модификация индекса Чарльсона проведена методом экспертной оценки Дельфи, а классификация больных – дискриминантным методом. При этом экспертами выявились 7 высококвалифицированных специалистов терапевтического и хирургического профилей со стажем практической работы не менее 15 лет, работающих на кафедрах внутренних болезней Курского государственного медицинского университета. После определения весовых значений каждой нозологической формы коморбидного фона в баллах проведено вычисление средней арифметической, которая использовалась в последующем у каждого больного для оценки его коморбидного фона.

Определение индекса Чарльсона проведено у 329 больных с осложнениями желчнокаменной болезни (холедохолитиаз, стеноз БСДК и их сочетание, синдром Мириззи, механическая желтуха), проходивших стационарное лечение в клинике хирургических болезней № 1 на базе отделения общей хирургии Курской областной клинической больницы с января 2010 г. по декабрь 2014 г. включительно (табл.1).

Лечение больных исследуемой группы осуществлялось по принятому в клинике алгоритму разрешения протоковой патологии (патент РФ на изобретение № 2268657) с включением в комплекс дооперационного обследования модернизированного нами индекса коморбидности Чарльсона.

Таблица 1

Индекс Чарльсона у больных с осложнениями желчнокаменной болезни

Группы	Пол	Возраст				
		молодой возраст 18-29	зрелый возраст 30-44	средний возраст 45-59	пожилой возраст 60-74	старческий возраст 75-89
1 группа	М	2	6	10	29	11
	Ж	7	24	46	63	45
2 группа	М	-	2	3	2	3
	Ж	-	5	6	8	10
3 группа	М	-	3	8	2	9
	Ж	2	3	8	1	11

В группу больных с I типом желчной гипертензии вошли 243 пациента (73,8%) с МЖ, протоковая патология у которых разрешалась эндоскопическим транспапиллярным вмешательством.

Группу пациентов со II типом желчной гипертензии составили 39 человек (11,9%) с тяжелой сопутствующей патологией, которым выполнялась декомпрессия желчных путей путем постановки крупнокалиберной холангиостомы, с последующей литотрипсией и литоэкстракцией под УЗИ-контролем или комбинированным способом с извлечением конкрементов через зону БСДК.

При этом была сформирована группа пациентов, в которую вошли 47 больных (14,3%), которым в силу особенностей зоны БСДК, больших размеров конкремента, синдрома Мириззи и невозможности проведения миниивазивных вмешательств были выполнены открытые операции на протоковой системе (холедохолитотомия с литоэкстракцией с внутренним или наружным дренированием общего желчного протока).

Все пациенты с изучаемой патологией прошли обследование на наличие сопутствующей патологии, оказывающей влияние на коморбидный фон и величину индекса Чарльсона. Частота сопутствующей патологии в выделенных 3-х группах больных рассчитывалась на 100 осмотренных, поскольку у одного пациента встречается несколько нозологических форм сопутствующих заболеваний. Распределение больных проводилось с учетом возраста и групп сопутствующих заболеваний, предложенных для оценки индекса Чарльсона и модифицированных нами в соответствии с результатами экспертного метода Дельфи (табл. 2).

Таблица 2

Распределение больных с учетом возраста и групп сопутствующих заболеваний

Группы сопутствующих заболеваний и возраст	Группы пациентов		
	1 группа	2 группа	3 группа
I. Инфаркт миокарда, хроническая сердечная недостаточность, нарушения ритма сердца, гипертоническая болезнь, стенокардия, болезнь периферических артерий	187	33	36
II. Цереброваскулярное заболевание, деменция, хроническое заболевание легких, болезнь соединительной ткани, язвенная болезнь	64	15	12
III. Легкое поражение печени, диабет, гемиплегия, умеренная или тяжелая болезнь почек, злокачественная опухоль без метастазов	15	7	5
IV.Умеренное или тяжелое поражение печени	-	2	-
V. Возраст: 18-29 лет	9	-	2
VI. Возраст: 30-44 лет	30	7	6
VII. Возраст: 45-59 лет	56	9	16
VIII. Возраст: 60-74 лет	92	10	3
IX. Возраст: 75-89 лет	56	13	20

Для анализа результатов исследования использовалась программа Statistica 6.0, критерий Стьюдента и Т-Уайта.

Результаты исследования

Используя экспертный метод Дельфи, проведена модернизация индекса коморбидности Чарльсона. Проведенная экспертная оценка наиболее важных сопутствующих заболеваний и возраста свидетельствует о лидирующей позиции умеренного или тяжелого поражения печени (табл. 3).

Вторую позицию по среднеарифметической величине баллов занимает легкое поражение печени, диабет, гемиплегия, умеренная или тяжелая болезнь почек.

На третьем месте, по мнению экспертов, находится II группа заболеваний (цереброваскулярное заболевание, деменция, хроническое заболевание легких, болезнь соединительной ткани, язвенная болезнь).

Далее по мере убывания значений баллов находятся I группа сопутствующих заболеваний и возраст больных 75-89 лет.

Таблица 3

Экспертная оценка по методу Дельфи ведущих сопутствующих заболеваний и возраста у больных после хирургических вмешательств

Группы сопутствующих заболеваний и возраст	Значение балла, установленное экспертом							Средне-арифмети-ческий балл
	1	2	3	4	5	6	7	
I. Инфаркт миокарда, хроническая сердечная недостаточность, нарушения ритма сердца, гипертоническая болезнь, стенокардия, болезнь периферических артерий	2	4	3	4	5	4	4	3,7
II. Цереброваскулярное заболевание, деменция, хроническое заболевание легких, болезнь соединительной ткани, язвенная болезнь	5	5	4	5	4	5	5	4,7
III. Легкое поражение печени, диабет, гемиплегия, умеренная или тяжелая болезнь почек, злокачественная опухоль без метастазов	6	7	6	6	6	7	6	6,3
IV.Умеренное или тяжелое поражение печени	7	6	7	7	7	6	7	6,7
V. Возраст: 18-29 лет	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,4	0,4	0,5
VI. Возраст: 30-44 лет	0,6	0,4	1	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6
VII. Возраст: 45-59 лет	1	2	0,6	1	2	1	1	1,2
VIII. Возраст: 60-74 лет	4	1	2	2	1	2	2	2,0
IX. Возраст: 75-89 лет	3	3	5	3	3	3	3	3,3

Таким образом, на основе экспертного метода Дельфи установлены для рассматриваемых (изучаемых) основных сопутствующих заболеваний и возраста среднеарифметические баллы, которые использованы нами у больных после ТПВ.

Для оценки согласованности мнения экспертов проводился расчет коэффициента конкордации по следующей формуле:

$$W = \infty \frac{12d}{m^2(n^3 - n)},$$

где

$$d = \sum_{i=1}^{m}\left[\sum_{j=1}^{m} r - \frac{1}{2}m(n+1)\right]^2,$$

m – количество экспертов;

n – количество критериев;

r_{ij} – ранги i-го показателя по j-му эксперту.

При оценке согласованности суждений экспертов по большей величине сопутствующих групп заболеваний и возраста у больных после ТПВ выявлена согласованность экспертов, поскольку величина коэффициента конкордации составляет W=0,869. Для имеющегося числа степеней свободы при вероятности безошибочного прогноза (P<0,05) расчетное значение $X^2_{расч.}$=84,37 существенно превышает $X^2_{табл.}$=23,7. Следовательно, $X^2_{расч.}$ превышает $X^2_{табл.}$, что указывает на согласованность мнений экспертов и объективность полученных результатов по среднеарифметическим баллам основных сопутствующих заболеваний и возраста после ТПВ, полученных при выполнении экспертного метода Дельфи.

Дифференциация (классификация) выделенных нами групп больных после

ТПВ проведена также посредством дискриминантного метода. Определив расстояние Махаланобиса для представителей первой группы G_1:0 и больных второй группы G_2:1, установлено, что изучаемые группы ошибочно дифференцированы в 8,7% и 9,2% случаев соответственно по основным сопутствующим заболеваниям и возрасту пациентов (табл. 4).

Таблица 4

Расстояние Махаланобиса для дифференцируемых групп больных после ТПВ по основным сопутствующим заболеваниям и возрасту

Код заболевания и возраста больных	Observed	G_1:0	G_2:1
1	G_1:0	0,048	4245,783
2	G_1:0	0,756	4085,564
3	G_1:0	2,824	4382,062
4	G_1:0	1,549	4158,253
5	G_1:0	1,242	4361,179
6	G_1:0	0,357	4058,453
7	G_1:0	0,859	4126,272
8	G_1:0	0,921	4085,405
9	G_1:0	0,834	4134,572
10	G_2:1	3651,902	3,543
11	G_2:1	4058,726	2,879
12	G_2:1	4344,581	0,953
13	G_2:1	4452,257	1,258
14	G_2:1	4273,631	2,706
15	G_2:1	4154,567	1,857
16	G_2:1	4380,122	0,729
17	G_2:1	4258,673	0,028
18	G_2:1	4212,809	0,015

Таким образом, дискриминантный метод свидетельствует, что выделенные группы больных после ТПВ с высокой вероятностью безошибочного прогноза достоверно отличаются по I группе (код 1), по II группе (код 2), по III группе (код 3), по IV группе (код 4) сопутствующих заболеваний, по возрасту 40-49 лет (код 5), по возрасту 50-59 лет (код 6), по возрасту 60-69 лет (код 7), по возрасту 70-79 лет (код 8), по возрасту 80-89 лет (код 9).

Дискриминантный метод и индекс Чарльсона указывают на необходимость проведения дифференцированной лечебной тактики в сравниваемых группах больных после ТПВ, поскольку они репрезентативно различаются по сравниваемым признакам.

Выполненная модификация индекса Чарльсона позволяет более объективно учитывать количественный вклад сопутствующих заболеваний и возраста в прогноз исходов лечения больных с механической желтухой желчнокаменного генеза. Полученные средние значения баллов по сопутствующим группам заболеваний и возрасту среди экспертов являются согласованными по величине коэффициента конкордации. Дискриминантный метод позволил классифицировать выделенные группы по изученным заболеваниям и возрасту с высокой безошибочной вероятностью.

Список литературы

1. Агарков Н.М., Артенян Н.В., Яковлев А.П. Диагностика нейродермита с учётом информативности показателей разного биологического качества у подростков // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2011. – Т. 10, № 3. –С. 497-501.

2. Агарков Н.М., Будник И.В. Рационализация диагностики неспецифического сальпингоофорита на основе анализа информативности и моделирования клинико-лабораторных показателей // Российский медицинский журнал. – 2012. – № 4. – С. 46-49.

3. Будник И.В. Математическое моделирование связей и прогнозирование гинекологической патологии // Вестник новых медицинских технологий. – 2012. – Т. XIX, №1. – С.29-32.

4. Поликритериальный математический отбор диагностических параметров локального кровотока и размеров яичников при остром сальпингоофорите / С.Н. Гонтарев, А.П. Яковлев, А.В. Шульга, В.А. Иванов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. – 2013. – № 11 (154), вып. 22/1. – С. 157-163.

5. Иванов А.В., Артенян Н.В., Гонтарев С.Н. Компьютерное и сетевое моделирование диагностики атопического нейродермита // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – № 2-1. – С. 48-52.

6. Дифференциация острого тонзиллита у детей на основе математических моделей / В.Ф. Луценко, Е.А. Гнездилова, Е.В. Стародубцева, А.В. Иванов, В.Н. Мишустин // Научные ведомости Белгородского государственного университета. – 2013. – № 11 (154), вып. 22/1. – С. 84-88.

7. Серёгин С.П., Забровский А.Н., Мишустин В.Н. Многокритериальное математическое моделирование и прогнозирование распространенности злокачественных новообразований // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – № 2-1. – С. 41-49.

8. Математический прогноз развития гипоксически-ишемической энцефалопатии у новорожденных детей / В.Н. Снопков, А.П. Яковлев, Л.В. Шульга, Г.И. Кислюк // Научные ведомости Белгородского государственного университета. – 2013. – № 11 (154), вып. 22/1. – С. 168-171.

9. Яковлев А.П. Дискриминантный метод в выявлении больных острым сальпингоофоритом // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. –№ 2-2. – С. 209-215.

Получено 10.06.15

N. M. Agarkov, Doctor of Medical Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: vitalaxen@mail.ru)

S. V. Ivanov, Doctor of Medical Sciences, Professor, Kursk State Medical University (e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

A.V. Golikov, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Kursk State Medical University (e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

A. S. Klimkin, Post-Graduate Student, Kursk State Medical University (e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

A MATHEMATICAL JUSTIFICATION OF THE EFFICIENCY INDEX OF CARLSON FOR THE TREATMENT OF PATIENTS WITH OBSTRUCTIVE JAUNDICE GALLSTONE GENESIS

Made a modification index of Charlson allows you to more objectively quantify the contribution of comorbidities and age in the prediction of treatment outcomes in patients with obstructive jaundice gallstone Genesis. Obtained average values of scores for concomitant disease groups and age among the experts are agreed on the value of the coefficient of concordance. Discriminant method allowed to classify the groups on the studied diseases and age-error-free with high probability.

***Key words**: discriminant method, method of expert evaluation of the Delphi method, the index of Charlson, cholelithiasis.*

УДК 614.8:572.18+354.72(096):262.58

В.Ю. Денисова, канд. мед. наук, ассистент, ГБОУ ВПО «Курский государственный медицинский университет» (e-mail: vdenisova@yandex.ru)

И.П. Рыжова, д-р мед. наук, профессор, ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (e-mail: ipr@yandex.ru)

С.Н. Гонтарев, д-р мед. наук, профессор, ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (e-mail: znamisng@yandex.ru)

И.С. Гонтарева, ассистент, ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (e-mail: znamisng@yandex.ru)

М.М. Денисов, ассистент, ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (e-mail: mmden@yandex.ru)

М.С. Саливончик, ассистент, ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (e-mail: vdenisova@yandex.ru)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОНСТРУИРОВАНИИ ОРТОДОНТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

В статье рассматривается использование метода конечных элементов в конструировании ортодонтических аппаратов.

***Ключевые слова**: конечные элементы, конструирование, ортодонтические аппараты.*

***

Введение

Проблема взаимоотношения тканей и органов полости рта с материалами, предназначенными для изготовления зубных протезов и ортодонтических аппаратов, является одной из основных в клинике ортопедической стоматологии и ортодонтии. Известно, что ткани и органы полости рта находятся в динамическом равновесии со сбалансированными биохимическими процессами, сохраняющими структуры тканей и поддерживающими их функцию [2, 6, 7, 12, 16]. Конструкции эксплуатируются в условиях агрессивной химической среды, какой является слюна. В свою очередь материал, из которого изготовлены конструкции, непосредственно оказывает обратное действие на среду полости рта и весь организм в целом [8, 9, 11, 15]. В настоящее время современные методы исследований дают возможность получить полное представление о свойствах материала и структуре вещества, его составе и строении, взаимодействии с другими материалами и биологическими средами. Термопластические полимеры, представленные на рынке, вызывают большой интерес и являются актуальными материалами для ортопедической и ортодонтической стоматологии. Однако недостаточный объем информации в научно-исследовательском плане, отсутствие обоснованных показаний в плане выбора вида термопластического полимера в зависимости от конкретной клинической ситуации как в детской, так и во взрослой стоматологической практике диктуют необходимость дальнейшего изучения этого вопроса.

Цель исследования – изучить возможность применения термопластических полимеров для конструирования ортодонтических аппаратов и с помощью математического анализа выбрать материал, наиболее соответствующий поставленным задачам.

Материалы и методы исследования

Было решено применить физико-математический метод для того, чтобы формулировать теоретическое обоснование предложенной новой конструкции

лечебного аппарата. Общеизвестно, что к числу наиболее эффективных технологий, позволяющих выполнить эти требования, принадлежат так называемые CAD-системы (computer-aided design) – системы автоматизированного проектирования. CAD-системы, базирующиеся на трехмерной геометрии, в настоящий момент нашли широкое применение при проектировании обширного спектра изделий. Для выполнения поставленных задач решено провести математическое моделирование напряженно-деформированного состояния и определение нагрузочных усилий ортодонтического аппарата, оснащенного системой снижения нагрузки, и применить численный метод на основе конечно-элементного анализа, т.е. метод конечных элементов.

Этот метод является сеточным методом, предназначенным для решения задач микроуровня, для которого модель объекта задаётся системой дифференциальных уравнений в частных производных с заданными краевыми условиями. Метод конечных элементов (МКЭ) в настоящее время является стандартом при решении задач механики твердого тела посредством численных алгоритмов. Для определения оптимальных параметров и формы ортодонтического аппарата предполагается создание точной трехмерной модели челюсти и модели аппарата, содержащего пассивную систему распределения нагрузки.

Моделирование проводится с помощью программного пакета SolidWorks, включающего в себя утилиту для исследования напряженно-деформированного состояния и динамики движения различных конструкций COSMOSWorks. Данный пакет позволяет на основе конечно-элементного анализа модели определить концентраторы напряжения и добиться максимально эффективного использования материала за счет снижения веса элементов конструкции с избыточным запасом прочности. В основе пакета COSMOSWorks стоит технология расчетов ADAMS, которая является мировым лидером в данной области уже более 20 лет.

В рамках исследования была разработана трехмерная твердотельная модель челюсти ребенка, учитывающая возможные перемещения корня зуба в периодонте.

При построении математической модели челюсти был использован профильный подход. По слепку реальной челюсти в масштабе 1:1 были получены формы профилей, после объединения их в единый объект была получена точная трехмерная модель (рис. 1).

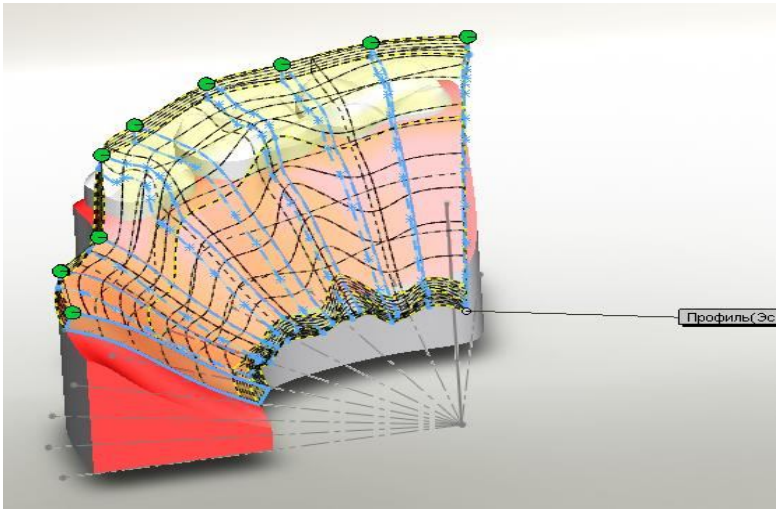


Рис. 1. Профильная форма разреза модели верхней челюсти

Далее аналогичным способом была получена трехмерная математическая модель исследуемого ортодонтического аппарата. Для определения оптимальных параметров конструкции ортодонтического аппарата был произведен сравнительный анализ сил, возникающих при деформации устройства. Изначально было проведено тестовое исследование аппарата без системы распределения нагрузки и с системой распределения.

Совместно с лабораторией кафедры теоретической механики и мехатроники Юго-Западного государственного университета была разработана на практике оригинальная экспериментальная модель «Стенд» (в дальнейшем просто стенд) для проведения экспериментальных испытаний упругих свойств ортодонтических аппаратов, способная измерять силу упругости, возникающую при их деформации, а также для подтверждения теоретических расчетов математического моделирования упругих характеристик ортодонтического аппарата с системой снижения нагрузки (рис. 2).

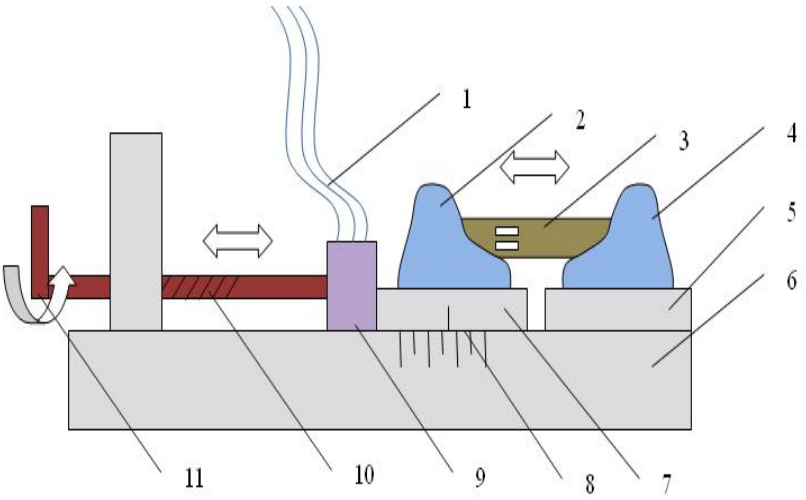


Рис. 2. Схема модели «Стенд» для исследования механических свойств ортодонтического аппарата: 1 – провода, соединяющие датчик усилия с системой индикации или с компьютером; 2 – фрагмент слепка челюсти; 3 – ортодонтический аппарат; 4 – фрагмент слепка челюсти; 5 – неподвижный держатель, в которой устанавливается фрагмент слепка; 6 – основание стенда; 7 – подвижный держатель, в который установлен фрагмент слепка; 8 – шкала, по которой определяется смещение; 9 – высокоточный датчик усилия; 10 – регулировочный винт; 11 – ручка регулировочного винта

Ортодонтический аппарат из исследуемого материала устанавливается в направляющих измерительного стенда между фрагментами гипсовой модели или с помощью фиксаторов. Далее регулировочным винтом устанавливается величина деформации аппарата, при этом сила упругости аппарата фиксируется датчиком, который значения усилия передает на блок обработки информации. Далее отфильтрованные и усредненные данные передаются на компьютер. Испытания проводились с шагом 0,156 мм, это соответствует повороту регулировочного винта на 45 градусов.

Результаты исследования и их обсуждение

С помощью физико-математического метода был произведен расчет упругости термопластических полимеров «DENTALD», «ACCEPLAST», «AKRYFREE», «ЭВИДСАН» в сравнительном аспекте. При моделировании исследовались ортодонтические аппараты, выполненные из рассматриваемых стоматологических материалов.

Исследовались основные параметры, характеризующие упругие свойства материала. Это функция жесткости – зависимость силы реакции от деформации элемента. На основе графиков краевой деформации построили функции жесткости исследуемого участка для каждого из материалов (рис. 3).

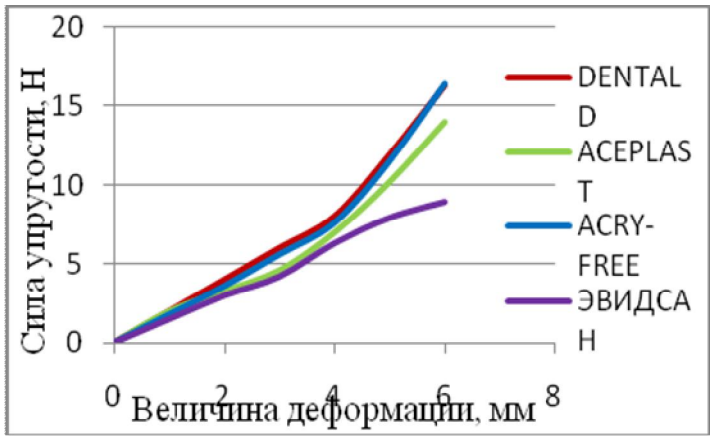


Рис. 3. Теоретические зависимости силы сопротивления от деформации ортодонтического аппарата, выполненного из материалов «DENTALD», «ACEPLAST», «ACRY-FREE», «ЭВИДСАН»

Выявлены характеристики упругости ортодонтических аппаратов, выполненных из различных материалов, при этом по оси ординат (по оси Y) отложены значения силы упругости, соответствующие смещению, показанному по оси абсцисс (ось X). Сравнительный анализ результатов проводился следующим образом: на графике теоретической зависимости силы упругости от деформации для материала «DENTALD» при значении краевого смещения 2 мм величина создаваемого усилия – 6 ньютонов, при таком же смещении, к примеру, для материала Эвидсан, сила упругости составляет 2,5 ньютона. Это говорит о том, что аппарат, выполненный из материала «DENTALD», является более упругим, чем аппарат, выполненный из материала «ЭВИДСАН».Общий анализ результатов показал, что для большинства материалов при увеличении деформации более чем на 2 мм сила давления ортодонтического аппарата на поверхность десны превышает 4 Н, также при значительном сжатии сила упругости резко возрастает и достигает значений более 14 Н, что может привести к неблагоприятным последствиям.

Испытания на стенде, когда ортодонтический аппарат размещен между двумя фиксаторами, подтвердили результаты, полученные теоретическим путем и в результате испытаний по первой методике. Для всех материалов наблюдается зона плавного нарастания упругой характеристики и небольшой подъем при переходе к большим деформациям (более 5 мм). Важным аспектом, который удалось получить с помощью физико-математического метода, является распределение нагрузки в материале, расположение и форма зоны распределения давления.

Доказано также, что сила давления, создаваемая базисами аппаратов из исследуемых термопластических полимеров, на подлежащие ткани не концентрируется в одной точке, как у обычных аппаратов, а оказывает позитивное равномерное давление на коронковую и корневую части перемещаемых зубов, на скат альвеолярного отростка и зачатки постоянных зубов. Из представленных после проведения эксперимента графиков следует, что наиболее упругими материалами из всех испытуемых оказались материалы «DENTALD» и «ACRY-FREE»,

однако для материала «ACRY-FREE» зафиксирован больший уровень жесткости, что негативно может сказаться на состоянии подлежащих тканей. Наименее упругим оказался материал «ЭВИДСАН» (рис. 4).

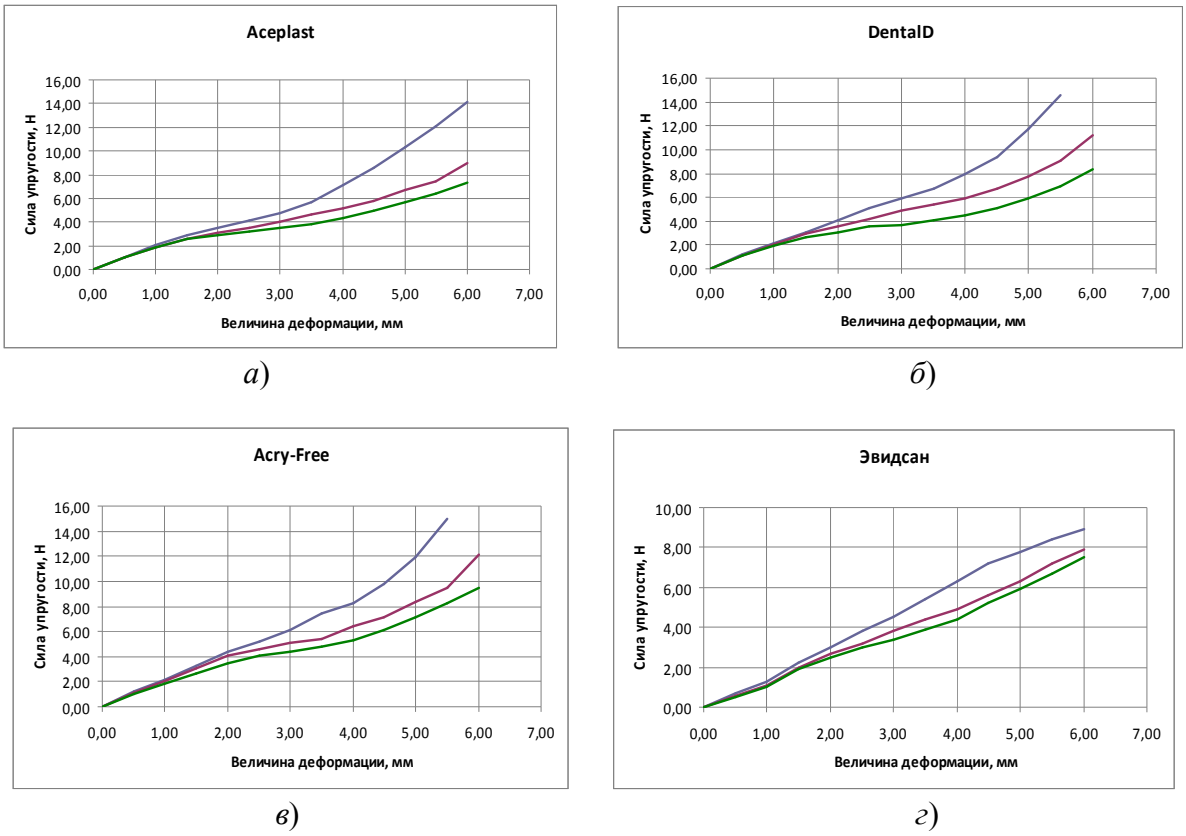


Рис. 4. Результаты значений функции жесткости для материалов: *а* – «DENTALD»; *б* – «ACEPLAST»; *в* – ACRY-FREE»; *г* – «ЭВИДСАН»

Заключение

В результате теоретических и экспериментальных методов математического моделирования при изучении упругих свойств термопластических полимеров был выбран базисный материал, наиболее отвечающий требованиям и задачам, соответствующим новой разработанной конструкции лечебного ортодонтического аппарата. В ходе проведенного математического моделирования были даны рекомендации по распределению нагрузки в материале, оптимальному расположению в аппарате зон ослабления нагрузки при конструировании нового ортодонтического лечебного аппарата.

Список литературы

1. Алимова М.Я., Макеева И.М. Планирование и методы математической обработки результатов научных исследований в медицине: учебное пособие. – М.: Русский врач, 2007. – С. 11-32.

2. Алимова М.Я. Современные технологии в ортодонтии // Ортодонтия. – 2005. – № 3. – С. 8-12.

3. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем / Московский государственный технический университет им. Баумана. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. – С. 384.

4. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Конструирование мехатронных модулей: учебник. – М.: Изд-во ИЦ МГТУ «СТАНКИН», 2004. – С. 360.

5. Денисова В.Ю., Рыжова И.П., Саливончик М.С. Использование метода пульсогемоиндикации в ортопедической стоматологии // Научные ведомости Бел-

городского государственного университетата. Сер.: Медицина, Фармация. – 2011. – № 16, вып. 15/1. – С. 184-187.

6. Использование компьютерных технологий проектирования лечебных зубных аппаратов из эластичных материалов / В.Ю. Денисова, И.П. Рыжова, Н.В. Чиркова, В.В. Чуев // Систем.анализ и управление в биомед. системах. – 2012. – Т. 11, № 4. – С. 1067-1069.

7. Применение эластичных полимеров в практике лечения трансверзальных аномалий окклюзии / И.П. Рыжова, С.И. Бурлуцкая, В.Ю. Денисова, А.С. Яцун // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер.: Медицина. Фармация. – 2011. – № 4, вып. 13. – С. 1067-1069.

8. Результаты биологических исследований базисных полимеров стоматологического назначения / И.П. Рыжова, В.Ю. Денисова, Т.В. Павлова, М.С. Саливончик // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 8-2. – С. 407-409.

9. Рыжова И.П., Денисова В.Ю. Изучение биосовместимости современных конструкционных полимерных материалов // Урал. мед. журн. – 2010. – № 8. – С. 36-40.

10. Сравнительный анализ эффективности окончательной обработки термопластических полимеров стоматологического назначения / И.П. Рыжова, Н.В. Чиркова, В.Ю. Денисова, М.С. Саливончик //Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2012. – Т. 11, № 4. – С. 981-984.

11. Comparison of the dimensional accuracy of injection-molded denture base materials to that of conventional pressure-pack acrylic resin / A. Parvizi, T. Lindquist, R. Schneider [et al.] //J. Prosthodont. – 2004. – Vol. 13, N 2. – P. 83-89.

12. Huang G.J. Bigfoot lives? // Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop. – 2006. – Vol. 129. – P. 323-324.

13. Rossi M., Ribeiro E., Smith R. Craniofacial asymmetry in development: an anatomical study // Angle Orthod. – 2003. – Vol.73, N 4. – P. 381-387.

14. Meiners Z. Verbunndfestigkeit zwischen Dental-D und verschiedenen // Kunststoff verblend materialien, dentallabor. – 2000. – N 9. – P. 126-131.

15. Proffit W.R. Contemporary orthodontic. – St. Louis ; Baltimor ; Boston : Mosby Year Book, 2007. – P.751.

Получено 08.06.15

V.Yu. Denisova, Candidat of Medical Sciences, Assistant, Kursk State Medical University
(e-mail: vdenisova@yandex.ru)

I.P. Ryzhova, Doctor of Medical Sciences, Professor, Belgorod State National Research University
(e-mail: ipr@yandex.ru)

S.N. Gontarev, Doctor of Medical Sciences, Professor, Belgorod State National Research University
(e-mail: znamisng@yandex.ru)

I.S. Gontareva, Assistant, Belgorod State National Research University
(e-mail: znamisng@yandex.ru)

M.M. Denisov, Assistant, Belgorod State National Research University (e-mail: mmden@yandex.ru)

M.S. Salivonchik, Assistant, Belgorod State National Research University
(e-mail: vdenisova@yandex.ru)

THE RESULTS OF THE USE OF THE FINITE ELEMENT METHOD IN THE DESIGN OF ORTHODONTIC APPLIANCES MADE OF THERMOPLASTIC POLYMERS

The article discusses the use of finite element method in the design of orthodontic appliances.
***Key words**: finite elements, design, orthodontic appliances.*

УДК 681.518.3

А.В. Земляков, магистрант, Волгоградский государственный технический университет (e-mail: alex.1307@mail.ru)

О.А. Тубол, магистрант, Волгоградский государственный технический университет (e-mail: sila9876@mail.ru)

В.А. Байдаченко, магистрант, Волгоградский государственный технический университет (тел.: (906)1743664)

Ю.П. Муха, д-р техн. наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (e-mail: muxaup@mail.ru)

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ ГОЛЕНОСТОПА В НЕЛИНЕЙНОМ СЛУЧАЕ

При создании передвигающихся механических средств невозможно не учитывать плавность хода, иными словами, антропоморфность движения. Одним из важных факторов, влияющих на плавность хода, является голеностопный сустав, точная модель которого позволяет повышать антропоморфность движения.

***Ключевые слова**: стопа, кости, связки, голеностопный сустав, нагрузка.*

***

Введение

В настоящее время большинство теоретических и практических разработок шагающих машин или протезов ориентированы на рассмотрение механических систем с абсолютно жёсткими звеньями. Такие модели имеют некоторые достоинства: проще уравнения движения, численное и аналитическое исследование составленных уравнений. Однако есть и недостатки – скорость распространения возмущений в абсолютно жёсткой модели бесконечно большая. При движении живых организмов, например при ходьбе человека, ускорения каждого элемента системы очень велики, и если бы звенья были абсолютно жёсткими, то ударная нагрузка в организме распространялась бы на все элементы системы мгновенно, т.е. ударом, в том числе и на головной мозг. В реальности подобные явления не наблюдаются. Поэтому следует рассматривать организм как структурно-упругую систему. При движении деформируемой системы происходит запасание энергии при постановке ноги на поверхность и её возвращение при следующем шаге. При этом практически вся энергия удара гаснет в суставах нижней конечности. Если рассматривать конечность в целом, то можно считать, что деформируется не сам сустав, а весь её «стержень». В этом случае целесообразно использовать модель с деформируемыми звеньями и возможностью приложения в суставах моментов, с помощью которых можно поддерживать вертикальное положение и осуществлять перемещение. Таким образом, система эффективно моделируется деформируемыми стержнями с упругим противодействием и смещением сустава.

Стопа – это одна из самых удивительных частей тела. Она способна выдерживать различного рода нагрузки и в то же время обеспечивать плавность хода из-за хороших мышц и связок. Известно, что в стопе находится четверть всех костей организма [1]. Её основной элемент – голеностопный сустав, включающий в себя несколько костей.

Попытки смоделировать движение человека продолжаются уже продолжительное время. Одна из первых простых и удачных попыток приведена в работе [2], где мышечная ткань представлена нерастяжимыми идеальными звеньями. В работе [5] мышцы представлены биомеханической моделью, которая состоит из трёхкомпонентной системы. В нашей работе будут опущены два из них и рассмотрены только упругие компоненты без демпфирования.

Все существующие ныне модели рассматривают стопу как единое целое, что, по нашему мнению, является суще-

ственным упущением, так как она оказывает на плавность хода сильное влияние. Поэтому, дабы восполнить модель и придать большую антропоморфность движению, была рассмотрена стопа с учётом нелинейностей, представленных в виде связок, и создана её математическая модель.

На рисунке 1 показана упрощённая модель стопы.

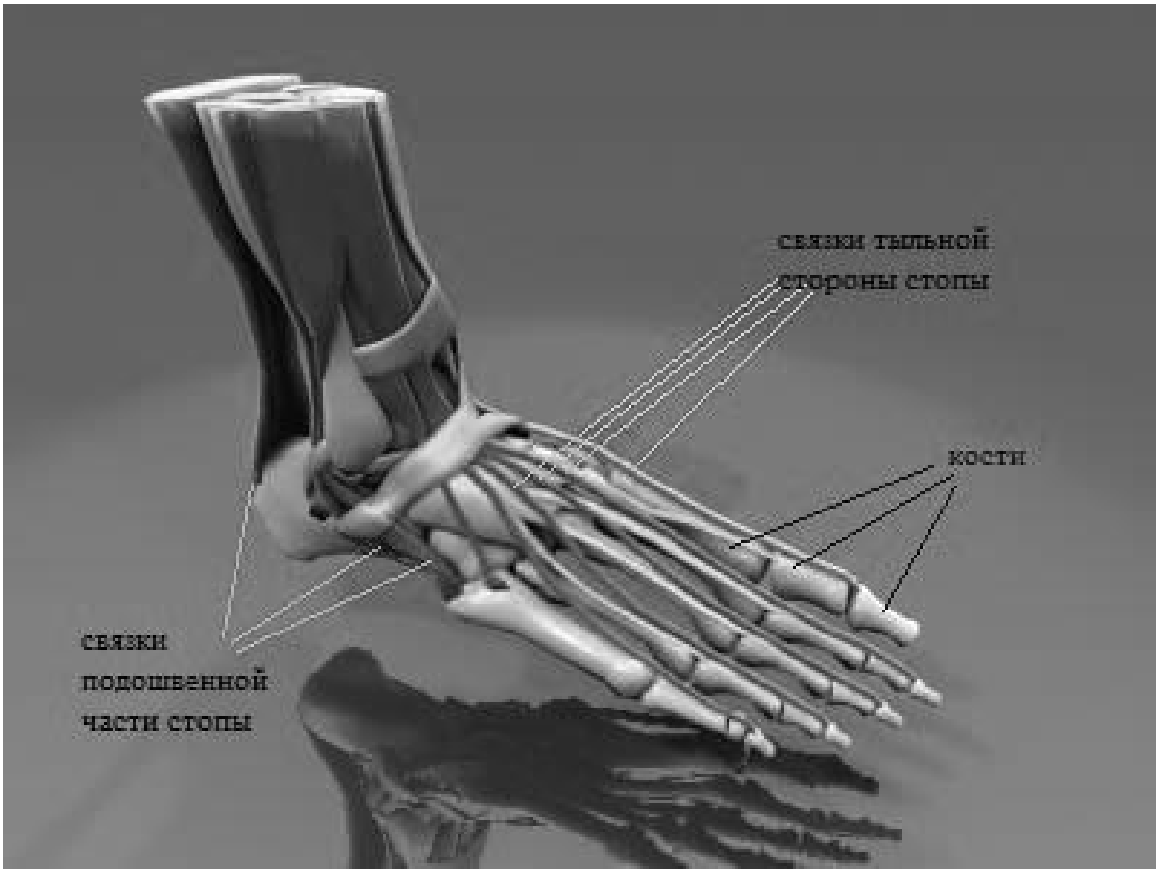


Рис. 1. Структурная схема элементов стопы

При составлении данной модели оказываются неучтёнными 4 кости и те взаимодействия, которые проходят между костьми без прикрепляющихся к ним связок или мышц.

Постановка задачи

Цель исследования – создание полной математической модели, описывающей все нагрузки на кости с учётом нелинейностей. Данная работа подразумевает упрощённый вариант, который впоследствии будет использоваться для создания более точной модели. И только её результаты можно будет учитывать в процессе проектирования протезируемых устройств или создания роботов.

Достижение поставленной цели связано с решением следующих задач:

1. Осуществить математическое моделирование взаимодействия двух костей с учётом прикрепления к ним связок (мышц).

2. Реализовать полученную модель на все возникающие взаимодействия костей и связок.

Математическое моделирование

Представим взаимодействие двух костей и связок в виде системы двух нерастяжимых спиц с прикреплёнными к ним мышцами (связками). Такая система представлена на рисунке 2. Здесь связки обозначены как пружины, т.е. представляют собой только упругие компоненты без учёта демпфирования.

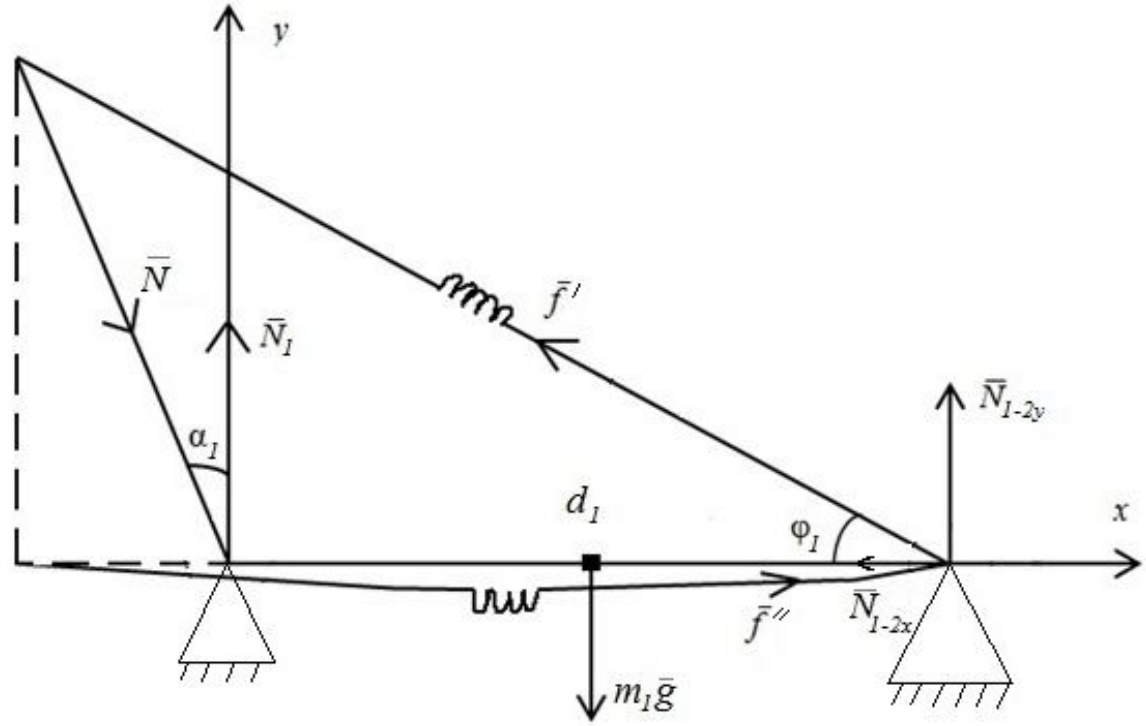


Рис. 2. Модель взаимодействия двух костей с учётом прикреплённых на них связок

Эта модель была приведена в работе [3]. В ней кости представлены в виде нерастяжимых спиц, а связки – в виде пружин.

Равновесие плоской системы сил описывается с помощью системы уравнений [4]

$$\begin{cases} \sum M_{oi} = 0, \\ \sum X_i = 0, \\ \sum Y_i = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Опираясь на рисунок 2, система уравнений (1) запишется в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{d_1}{2} N_{1-2y} - N\frac{d_1}{2}\cos\alpha_1 - N_1\frac{d_1}{2} - \frac{d_1}{2} f'\cos\varphi_1 = 0; \\ f'' + N\sin\alpha_1 - N_{1-2x} - f'\cos\varphi_1 = 0; \\ N_{1-2y} - N\cos\alpha_1 - m_1 g + N_1 + f'\sin\varphi_1 = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где длина 1-й кости обозначена как d_1;

m_1 – масса кости;

α_1 – угол приложения нагруженной силы (N);

φ_1 – угол прикрепления тыльной связки;

сила реакции 1-й кости при приложении внешней нагрузки $N - N_1$. f' и f'' обозначены упругие компоненты силы, возникающие в соответствующих связках, куда входят коэффициенты упругости связок.

Здесь и в дальнейшем одним штрихом будут обозначаться связки с тыльной стороны, двумя штрихами – связки с подошвенной части. Нагрузку $N_{1\text{-}2}$, которая идёт дальше на 2-ю кость, разложили на две составляющие по осям абсцисс и ординат.

Решая систему (2) и учитывая то, что $N_{1-2} = \sqrt{N_{1-2x}^2 + N_{1-2y}^2}$, можно получить искомую нагрузку:

$$N_{1-2}=\sqrt{\left(f''+N\sin\alpha_1-f'\cos\varphi_1\right)^2+\left(N\cos\alpha_1+\frac{m_1g}{2}-\frac{f'}{2}\theta_1\right)^2}, \qquad (3)$$

где $\theta_1 = \sin\varphi_1 - \cos\varphi_1$.

Перейдём от простой модели взаимодействия двух костей со связками к более сложной. Рассмотрим большой палец стопы. Его нагрузка распределяется по шести костям плюс различного рода связки. Схематически он представлен на рисунке 3.

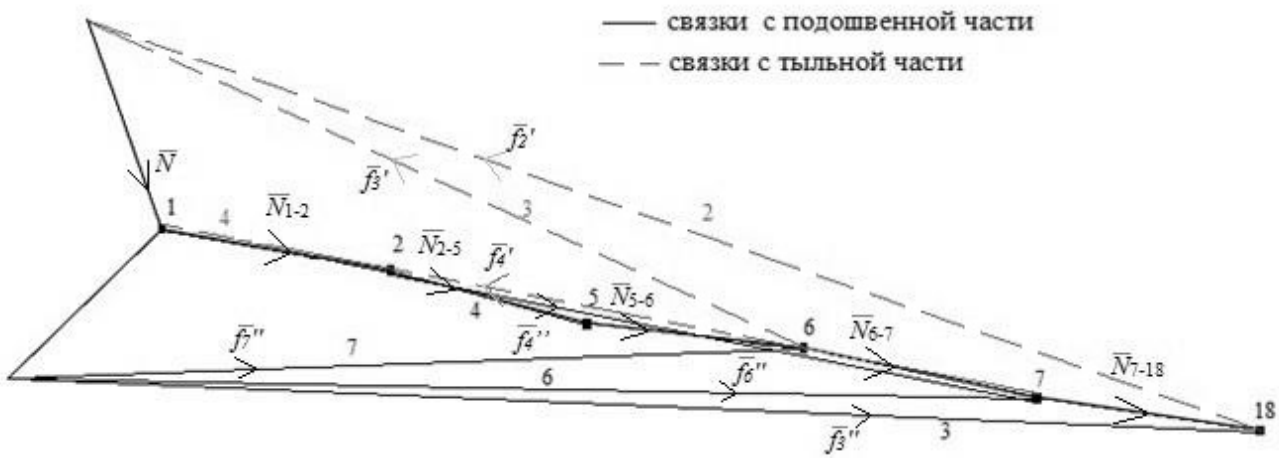


Рис. 3. Схема большого пальца

На рисунке 3 точками 1, 2, 5, 6, 7, 18 обозначены начала костей, которые участвуют в распределении нагрузки по данному пальцу, цифрами 2, 3, 4 – номера связок, прикреплённых к соответствующим по анатомии костям с тыльной стороны стопы, и цифрами 3, 4, 6, 7 – номера связок с подошвенной части стопы.

Далее будем рассматривать поэлементно взаимодействие костей и связок, начиная с первой прикреплённой от кости под номером 1. Из рисунка 3 видно, что первым таким случаем будет взаимодействие между 5 и 6 костьми. Это взаимодействие соответствует тому, которое было рассмотрено в начале статьи, поэтому, опираясь на приведённые выкладки, можно получить искомую нагрузку:

$$N_{5-6}=\sqrt{\left(f''_7+N_{2-5}\sin\alpha_5-f'_3\cos\varphi_5\right)^2+\left(N_{2-5}\cos\alpha_5+\frac{m_5g}{2}-\frac{f'_3}{2}\theta_5\right)^2}. \qquad (4)$$

Из рисунка 3 видно, что дальнейшие взаимодействия между элементами идентичны рассмотренному выше, поэтому проделывая те же операции для последующих костей, можно получить следующие нагруженные силы:

$$N_{6-7}=\sqrt{\left(f''_6+f''_4+N_{5-6}\sin\alpha_6-f'_4\cos\varphi_6\right)^2+\left(N_{5-6}\cos\alpha_6+\frac{m_6g}{2}-\frac{f'_4}{2}\theta_6\right)^2}; \qquad (5)$$

$$N_{7-18}=\sqrt{\left(f_3''+N_{6-7}\sin\alpha_7-f_2'\cos\varphi_7\right)^2+\left(N_{6-7}\cos\alpha_7+\frac{m_7 g}{2}-\frac{f_2'}{2}\theta_7\right)^2}. \quad (6)$$

Выполняя аналогичные выводы для остальных пальцев, можно получить искомые нагружающие силы голеностопа для устойчивого положения с учётом нелинейностей.

Заключение

В результате проведённых исследований и допущений была получена первая приближенная модель взаимодействий костей большого пальца стопы с учётом закреплённых связок. Все нелинейности учтены силами упругости *f*, от точности определения которых зависит, насколько будет правдоподобна данная модель.

Список литературы

1. Сапин М.Р., Никитюк Д.К. Карманный атлас анатомии человека. – Элиста: АПП «Джангар», 1999. – 680 с.

2. Формальский А.М. Перемещение антропоморфных механизмов. – М.: Наука, 1982. – 368 с.

3. Zemlyakov A.V., Tubol O.A. Spatial model of ankle // Innovative Information Technologies: Materials of the International scientific-practical conference. – Prague, 2014. – №2. – С. 167-169

4. Яблонский А.А., Никифорова В.М. Курс теоретической механики: в 3 ч. – Ч. 2. Статика. Кинематика. – М.: Высшая школа, 1966. – 440 с.

5. Зациорский В.М., Аруин А.С., Селуянов В.Н. Биомеханика двигательного аппарата человека. – М.: Физкультура и спорт, 1981. – 143 с.

Получено 29.06.15

A.V. Zemlyakov, Undergraduate, Volgograd State Technical University (e-mail: alex.1307@mail.ru)

O. A. Tubol, Undergraduate, Volgograd State Technical University (e-mail: sila9876@mail.ru)

V.A. Baydachenko, Undergraduate, Volgograd State Technical University (ph. (906)1743664)

Y.P. Mucha, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (e-mail: muxaup@mail.ru)

THE SPATIAL MODEL OF ANKLE ELEMENTS IN THE NONLINEAR CASE

When creating a moving mechanical device it is impossible to ignore the smoothness of motion, in other words the anthropomorphic nature of the movement. One of the most important factors affecting the smoothness is the ankle joint, whose exact model allows to improve the anthropomorphic nature of the movement.

***Key words**: foot, bones, ligaments, ankle joint, the load.*

УДК 615.47

Н.А. Кореневский, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

А.Н. Шуткин, канд. физ.-мат. наук, Воронежский институт государственной противопожарной службы (e-mail: anshutkin@mail.ru)

Е.А. Бойцова, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: elena-boitcova@mail.ru)

Е.Н. Кореневская, преподаватель, Донецкий национальный технический университет (Украина)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЯ ЛАТЕНТНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Рассматриваются вопросы использования теории измерения латентных переменных на основе статистических моделей Г. Раша для решения задач оценки уровня психоэмоционального напряжения.

***Ключевые слова**: психоэмоциональное напряжение, латентные переменные, информативный признак, нечёткие решающие правила.*

***

Введение

Решение задачи оценки уровня психоэмоционального напряжения является актуальной проблемой современной психологии и медицины, поскольку психоэмоциональное напряжение – важный фактор, влияющий на качество работы информационно-насыщенных человеко-машинных систем, а также «спусковой» механизм в появлении и развитии целого ряда психосоматических заболеваний.

С математической точки зрения задача оценки уровня психоэмоционального напряжения (ПЭН) относится к классу плохоформализуемых задач, поскольку отсутствует чётко сформулированное содержательное понятие психоэмоционального напряжения. Различные группы специалистов дают собственные определения, удобные для решения различных прикладных задач. В таких условиях имеет место отсутствие достаточно точных моделей количественной оценки уровня психоэмоционального напряжения.

В современной математике существуют различные подходы к решению плохоформализуемых задач, среди которых определённое место занимает теория измерения латентных переменных (IRT), которая основывается на том, что результат принимаемых решений не поддаётся прямым измерениям, в то время как исходные данные для его определения можно измерить и рассчитать [10, 13, 14, 22, 23].

Такая ситуация характерна и для задачи оценки уровня ПЭН, когда вывод об исследуемом состоянии организма можно сделать на экспертном уровне, а признаки, его характеризующие, могут быть получены путём измерения психологических, психофизиологических и физиологических характеристик организма.

В общем виде в теории *IRT* устанавливается связь между двумя множествами значений латентных переменных. Первое множество – значения латентных переменных, характеризующих уровень качества объектов θ_i, где i – номер объекта, $i=1,2,\ldots,n$. Второе множество – значения латентных переменных, определяющих значимость j-го индикатора β_j ($j=1,2, \ldots, m$) [10, 22].

Георг Раш предложил разместить на одной шкале уровень качества объектов θ_i и уровень значимости индикаторов β_j и измерять их в одних и тех же единицах, называемых логитами. За аргумент функции «успеха» или достижения данного уровня качества объекта принята разность $\theta_i - \beta_j$. Если данная разность положительна и велика, то высока и веро-

ятность достижения «успеха», то есть высокого значения латентного показателя i-го объекта при j-м индикаторе. Если же данная разность отрицательна и велика по модулю, то будет низкой и вероятность достижения «успеха».

В интерпретации, рассматриваемой в данной работе, под успехом будем понимать возможность оценки уровня ПЭН с заданной точностью (латентная переменная) по величинам признаков, характеризующих этот уровень (индикаторные переменные).

Метод исследования

В теории измерения латентных переменных, основанной на модели Г. Раша, основной математической зависимостью является логистическая модель следующего вида [10, 22]:

$$P_{ij} = \frac{e^{\theta_i - \beta_j}}{1 + e^{\theta_i - \beta_j}}. \qquad (1)$$

В терминах решаемой задачи в выражении (1) параметр P_{ij} определяется как вероятность того, что у обследуемого с номером i при использовании информативных признаков x_j измеряется уровень утомления θ_i, определяемый в логитах; β_j – значение j-й индикаторной переменной – эффективность использования признака x_j для оценки величины уровня психоэмоционального напряжения.

Все латентные переменные измеряются в логитах, которые формируются при переходе от количественных шкал (традиционно принятые в медицине шкалы измерений информативных признаков) x_i к безразмерным интервальным шкалам K_i.

Для перевода количественных шкал x_i (i=1, 2, 3, …, n) в качественные шкалы K_i (i=1, 2, 3, …, n) используется формула вида

$$K_i = \begin{cases} \mathrm{int}\left(\dfrac{x_i - x_{i,\min}}{R_i}\right) & \text{при } x_i < x_{i,\max}; \\ n-1 & \text{при } x_i = x_{i,\max}, \end{cases} \qquad (2)$$

где x_i – текущее натуральное значение i-го индикатора;

$x_{i,\min}$ – наименьшее значение i-го индикатора;

$x_{i,\max}$ – наибольшее значение i-го индикатора;

R_i – длина интервала шкалы K_i;

int(M) – целая часть числа M.

При этом длина интервала шкалы K_i определяется по формуле

$$R_i = \frac{x_{i,\max} - x_{i,\min}}{n}.$$

Для исследования роли индикаторных переменных в формировании латентной переменной разработан пакет прикладных программ RUMM 2020 (*Rasch Unidimensional Measurement Models*) [21, 22]. Используя значения индикаторных переменных, переведенных в логиты, пакет RUMM 2020 строит теоретические (характеристические) кривые модели Г. Раша, по которым судят о соответствии индикаторных переменных этой модели и в ходе итерационных процедур формируют пространство информативных признаков. Пример такого графика приведён на рисунке 1.

Относительно теоретической кривой по обучающей выборке формируются три примерно равные группы – с низким, средним и высоким уровнем исследуемых состояний человека, для которых определяются координаты их средних значений (три точки на рисунке 1). Считается, что если индикатор (информативный признак) хорошо соответствует общему набору индикаторов, то точки, соответствующие «слабым», «средним» и «сильным» уровням, близко располагаются относительно характеристической кривой.

Мера близости координат средних значений к теоретической кривой Г. Раша определяется по критерию Хи-квадрат.

В ходе реализации пакета RUMM 2020 рассчитываются:

– степень соответствия индикаторных переменных модели измерения (латентной переменной «психоэмоциональное напряжение») – *ChiSq Prob* ($\chi^2_{\text{критич.}}\ \mathrm{Pr}\,ob$);

– местоположение индикаторной переменной, измеряемой в логитах – *Location*;

– погрешность измерения местоположения индикаторной переменной, измеряемой в логитах – *SE;*

– величина, характеризующая суммарное отклонение значений данного индикатора от ожидаемых значений на основе модели – *FitResid.*

Считается, что индикаторная переменная, для которой $\chi^2_{\text{критич.}}\ \Pr ob \geq 0,05$ (при доверительной вероятности 0,95), удовлетворяет модели Г. Раша и может быть использована для описания исследуемой переменной. В работах [10, 14] можно найти подробное описание процедуры формирования списков индикаторных переменных, адекватных модели Г. Раша и пригодных для оценки исследуемой латентной переменной.

При реализации пакета прикладных программ RUMM 2020 кроме таблиц расчётов исследуемых параметров формируется график соответствия между уровнем интегрального показателя латентной переменной и значимостью индикаторных переменных (рис. 2).

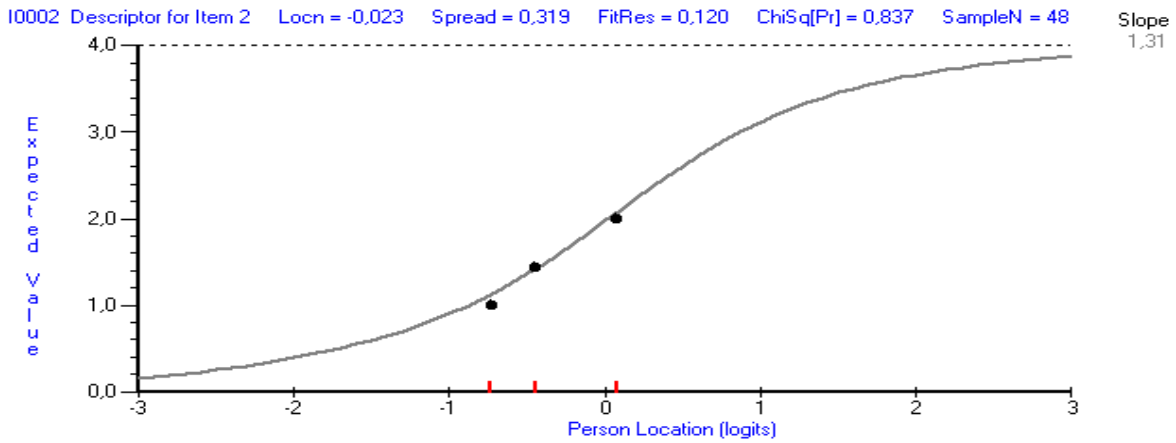


Рис. 1. Характеристическая кривая для индикатора x_i информативного признака (индикатора): ось абсцисс – шкала логитов индикаторных переменных; ось ординат – шкала логитов латентной переменной

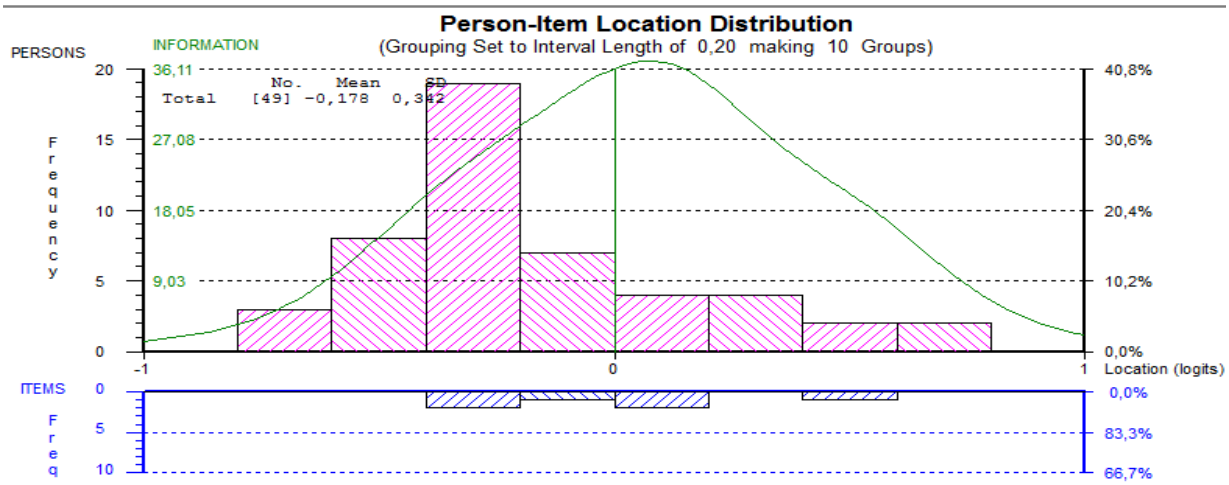


Рис. 2. Соответствие между уровнем интегрального показателя латентной переменной (вверху) и местоположением информативных признаков (индикаторов) (внизу)

На рисунке 2 осью абсцисс является шкала исследуемой латентной переменной L. По оси ординат верхней части рисунка 2 откладывается число объектов (людей из обучающей выборки), попадающих в полученные интервалы латентной переменной. То есть фактически этот рисунок представляет собой гистограмму распределения объектов наблюдения по шкале L. По оси ординат нижнего рисунка откладывается число информативных переменных, приходящихся на выделенные интервалы латентной переменной.

В идеальном случае гистограмма распределения значимости критериев должна быть близка к равномерному закону распределения [10, 22, 23]. Это означает, что представленный набор информативных признаков (индикаторов) с одинаковой точностью позволяет оценить исследуемый уровень ПЭН на всём диапазоне изменения значимости информативных признаков (индикаторов).

Средняя значимость информативных признаков (индикаторов) не должна отличаться от среднего уровня интегрального показателя более чем на 0,5 логит [14]. Если это условие выполняется, то можно сделать вывод о том, что система информативных признаков (индикаторов) соответствует измеряемой латентной переменной и набор используемых информативных признаков (индикаторов) является эффективным для целей измерения обобщенной латентной переменной.

Используя теорию измерения латентных переменных с моделью Г. Раша, можно не только получить число, обозначающее информативность того или иного признака, но и дать развёрнутое описание ряда его качественных свойств:

– способность дифференцировать шкалы принимаемых решений (уверенность в прогнозе, диагнозе);

– способность признака дифференцировать исследуемую латентную переменную в противоположность ожидаемой ситуации;

– определять признаки со сверхвысокой и сверхнизкой дискриминирующей способностью, признаки с «неупорядоченной» классификацией и т. д.

Такая гибкость анализа системы информативных признаков на основе модели Г. Раша позволяет рекомендовать её как один из основных механизмов проведения разведочного анализа при решении общих задач синтеза моделей вычисления латентной переменной прогностических и диагностических решающих правил.

В пакете RUMM 2020 предусмотрена возможность определения функциональной связи между латентной переменной L, определяемой в логитах, и выбранным набором индикаторных переменных S_j:

$$L = f_L(S_j), \qquad (3)$$

где f_L – вид функциональной зависимости L от S_j.

На рисунке 2 латентная переменная L представлена осью абсцисс.

Часто при синтезе решающих правил в условиях нечеткости и неопределенности используется аппарат нечеткой логики принятия решений с определением функций принадлежности к исследуемым класса состояний и (или) уверенности в принимаемых решениях по интервальной шкале [0;1] [3, 4, 5, 7, 8, 15, 16, 18, 19, 20, 21].

Для согласованного применения нечеткой логики принятия решений целесообразно шкалу L в логитах использовать как базовую переменную для построения функций принадлежности $\mu_{\omega_l}(L)$ объекта исследований к классам состояний ω_ℓ или для построения нечётких функций уровня исследуемого состояния $f_{\omega_\ell}(L)$, включая уровень ПЭН.

Синтез правил расчёта уровня психоэмоционального напряжения на основе модели Г. Раша

В соответствии с рекомендациями работ [1, 2, 6, 11, 12] в качестве индикаторных переменных для оценки уровня

ПЭН были выбраны три группы показателей, определяемые по блоку биологически активных точек, «связанных» с психоэмоциональным напряжением (точки R8, VB20 и P9); по блоку показателей, характеризующих состояние внимания, и по блоку субъективных тестовых методик.

По блоку биологически активных точек уровень ПЭН определяется выражением

$$YP_Б(j+1) = YP_Б(j) + \\ + f_P(\delta R_{j+1})\left[1 - YP_Б(j)\right], \quad (4)$$

где δR_j – относительное отклонение сопротивления БАТ с именем j от номинальной величины;

$$YU_Б(1) = f_P(\delta R_{R8});$$

$$R_2 = R_{VB20};\ R_3 = R_{P9}.$$

По показателям внимания уровень ПЭН определяется с использованием метода диалогового конструирования двумерных отображающих пространств по координатам (Y_1, Y_2) в его нечёткой интерпретации [5,19].

В соответствии с этим методом

$$YP_B = \min\left[f_P(Y_1), f_P(Y_2)\right], \quad (5)$$

где $f_P(Y_1) = \begin{cases} 0, & если \quad Y_1 < 0; \\ 0,01Y_1, & если \quad 0 \le Y_1 < 80; \\ 0,8, & если \quad Y_1 \ge 80, \end{cases}$

$$f_P(Y_2) = \begin{cases} 0, & если \quad Y_2 < -10; \\ 0,01Y_2 + 0,1, & если \quad -10 \le Y_2 < 70; \\ 0,8, & если \quad Y_2 \ge 70, \end{cases}$$

$$Y_1 = X_n + X_k;\ Y_2 = X_y;\ X_n = ПВ - ПВ_0;$$

$$X_k = КВ - КВ_0;\ X_y = УВ - УВ_0;$$

ПВ и $ПВ_0$ – текущая переключаемость внимания и переключаемость внимания, измеренная в состоянии спокойного бодрствования;

КВ и $КВ_0$ – соответствующие показатели концентрирования внимания;

УВ и $УВ_0$ – соответствующие показатели устойчивости внимания [17].

По компьютерным тестовым методикам уровень ПЭН оценивается по традиционным тестовым шкалам ситуативной (СТ) и личностной (ЛТ) тревожности в соответствии с выражением

$$YP_T = f_P(CT) + f_P(ЛТ)\left[1 - f_P(CT)\right], \quad (6)$$

где $f_P(CT) =$

$$= \begin{cases} 0, & если \quad CT < 35; \\ 0,0013CT - 0,58, & если \quad CT \ge 35, \end{cases}$$

$$f_P(ЛТ) =$$

$$= \begin{cases} 0, & если \quad ЛТ < 40; \\ 0,0012ЛТ - 0,5, & если \quad ЛТ \ge 40. \end{cases}$$

Подробное описание методик определения индикаторных переменных $YP_Б$, YP_B, YP_T можно найти в работах [1, 2, 12].

Для использования диалогового пакета RUMM 2020 в ходе специально проводимых исследований формировалась таблица индикаторных переменных, характеризующих латентную переменную, названную уровнем ПЭН – YP_F. Шкала YP_F, выраженная в логитах, обозначена в работе как YPL_F . Фрагмент данных приведен в таблице 1.

Таблица 1

Значения показателей индикаторных переменных для латентной переменной YU_F

IP \ *N*	1	2	3	4	5	6	…	28	29	30
$YP_Б$	0,02	0,0	0,09	0,07	0,11	0,21	…	0,88	0,86	0,91
YP_T	0,03	0,01	0,08	0,06	0,12	0,18	…	0,87	0,9	0,89
YP_B	0,03	0,00	0,07	0,11	0,09	0,19	…	0,81	0,89	0,87

В таблице 1 N – номер обследуемого, IP – индикаторные переменные.

Для запуска пакета RUMM 2020 исходные данные таблицы 1 по формуле (2) были переведены в безразмерные шкалы. На рисунке 3 показан скриншот степени соответствия индикаторных переменных модели Г. Раша.

Расчетное критическое значение уровня значимости, характеризующее соответствие данного набора индикаторов модели Раша, при числе степеней свободы df=12, $\chi^2_{\text{критич.}}$ $\Pr ob$=0,999. Это больше 0,05 (при доверительной вероятности, равной 0,95). Индекс сепарабельности (*Separation Index*) достаточно высокий и равен 0,993. Коэффициент альфа Кронбаха (*Cronbach Alpha*) также высок и равен 0,996. Мощность (оценка) системы индикаторов (*Power of Test-of-Fit*) оценивается как превосходная (*excellent*).

В процессе работы диалоговой системы RUMM 2020 была получена таблица индикаторных переменных, ранжированная по возрастанию значений *ChiSq Prob* (Хи-квадрат) (рис. 4).

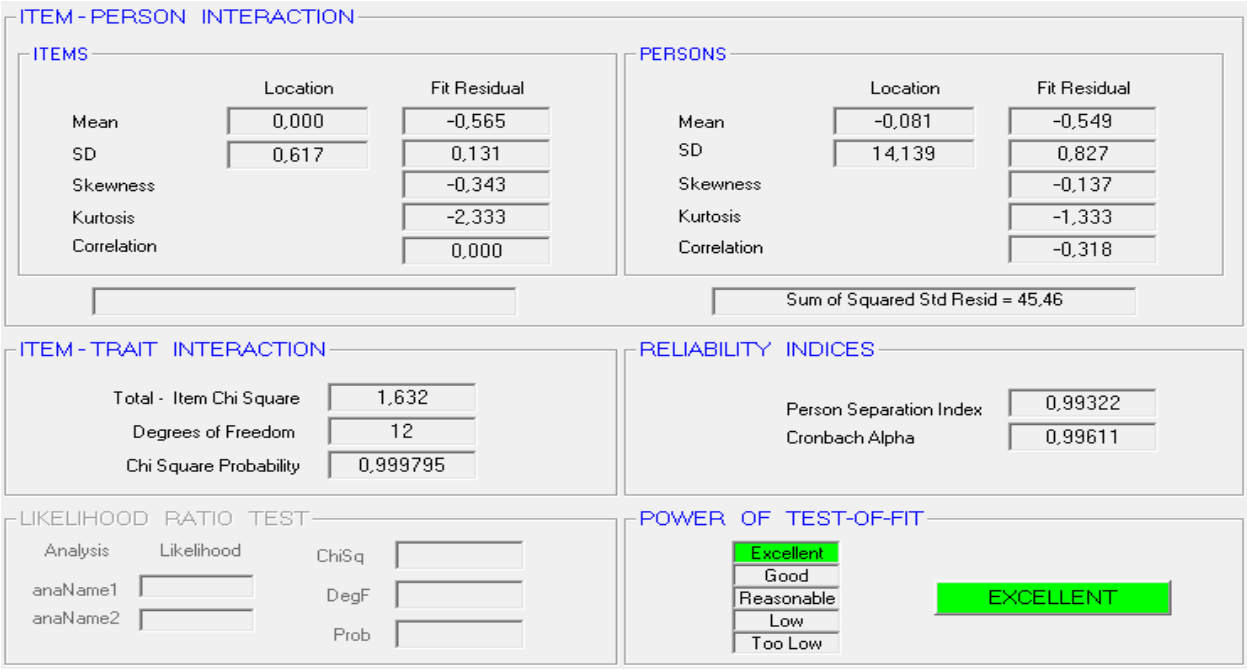
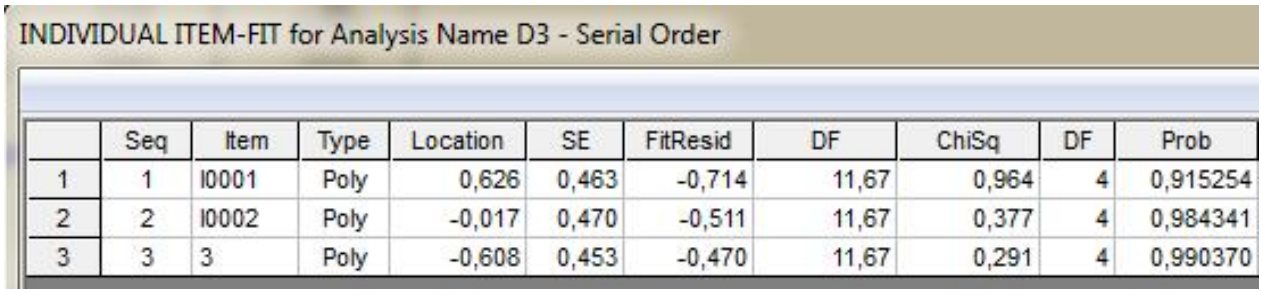


Рис. 3. Скриншот степени соответствия



INDIVIDUAL ITEM-FIT for Analysis Name D3 - Serial Order

	Seq	Item	Type	Location	SE	FitResid	DF	ChiSq	DF	Prob
1	1	I0001	Poly	0,626	0,463	-0,714	11,67	0,964	4	0,915254
2	2	I0002	Poly	-0,017	0,470	-0,511	11,67	0,377	4	0,984341
3	3	3	Poly	-0,608	0,453	-0,470	11,67	0,291	4	0,990370

Рис. 4. Скриншот таблицы индикаторных переменных

Из таблицы рис. 4 следует, что все индикаторные переменные имеют показатель $\chi^2_{\text{критич.}}$ $\Pr ob > 0{,}05$. Это означает, что данный набор индикаторов удовлетворяет модели Г. Раша и может быть использован для определения латентной переменной YP_F – уровень ПЭН.

Используя значения индикаторных переменных, пакет RUMM 2020 строит теоретические кривые модели Г. Раша, по которым судят о соответствии индикаторных переменных модели Г. Раша. Набор характеристических кривых для индикаторов $YP_Б$, $YP_В$, $YP_Т$ приведён на рисунках 5–7.

Обобщенной характеристикой соответствия между интегральной латентной переменной и системой индикаторов служат соответствующие гистограммы распределения, аналогичные изображенным на рисунке 2.

На рисунке 8 представлена гистограмма распределения по шкале интегрального показателя «YPL_F – уровень ПЭН в логитах».

Анализ графика (см. рис. 8) показывает наличие трёх довольно чётко выраженных состояний обследуемых.

Анализ распределения обследуемых по шкале YPL_F позволяет сделать вывод о том, что полученные данные практически равномерно заполняют всю эту шкалу, сформированную из шкал индикаторных переменных, причём большим значениям индикаторных переменных соответствует большее значение латентной переменной YPL_F.

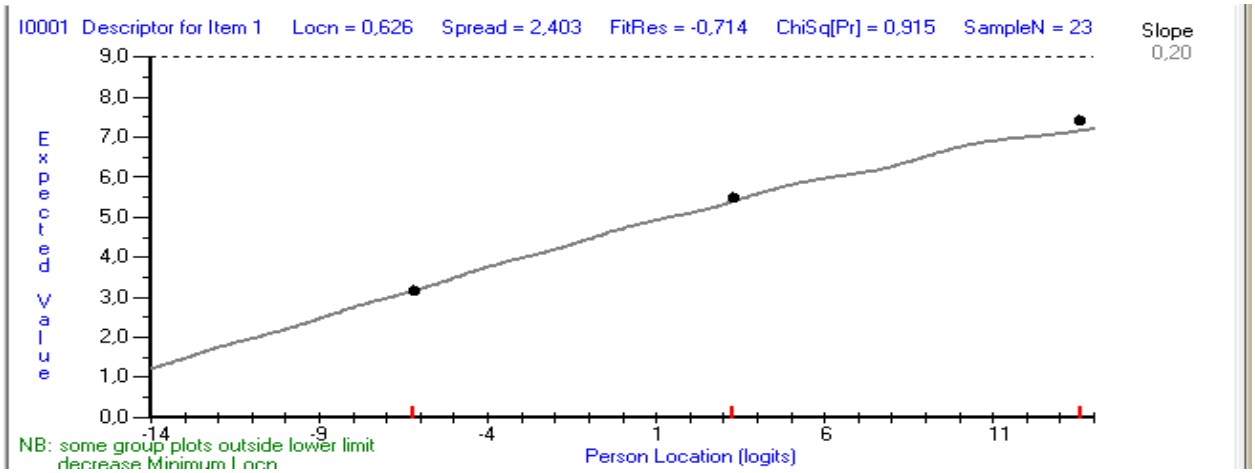


Рис. 5. Характеристическая кривая для индикатора $YP_Б$

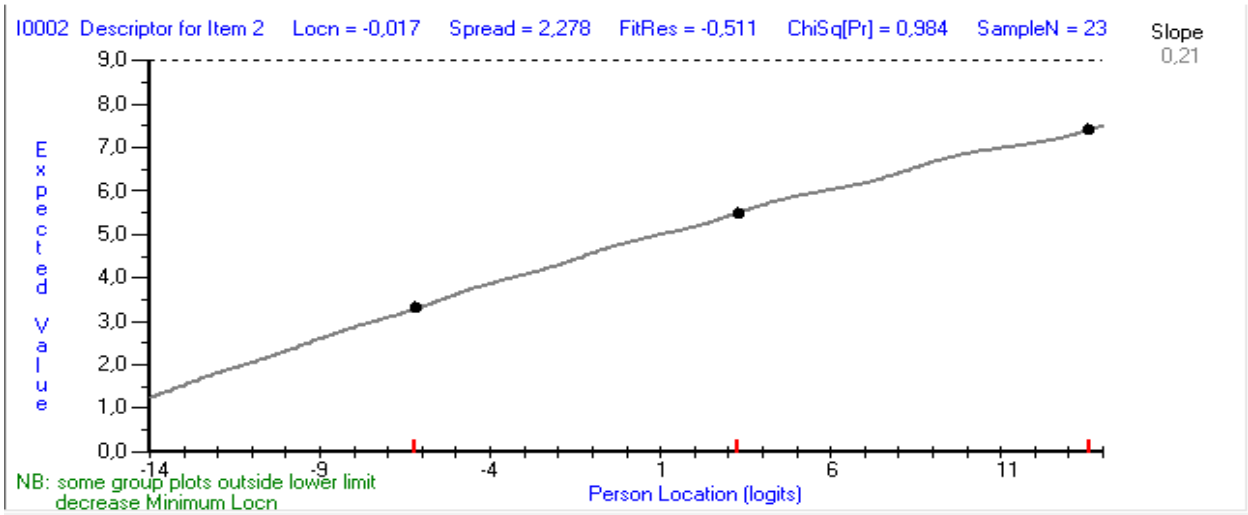


Рис. 6. Характеристическая кривая для индикатора $YP_В$

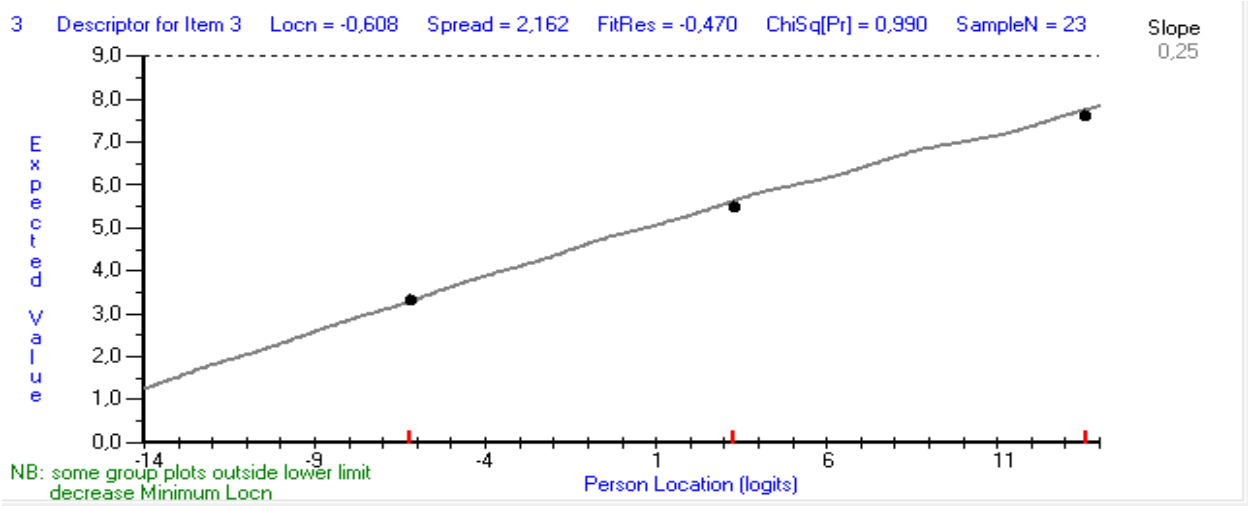


Рис. 7. Характеристическая кривая для индикатора YP_T

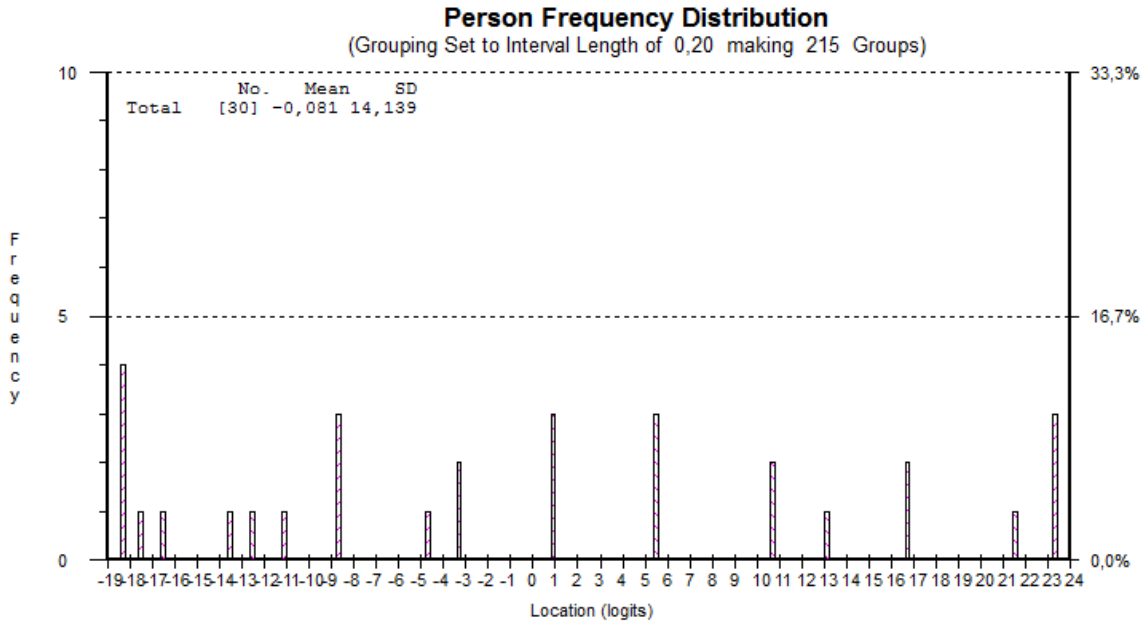


Рис. 8. Распределения интегрального показателя «YPL_F – уровень ПЭН»

Такое распределение позволило экспертам сделать вывод о существовании квазилинейной связи индикаторных переменных с латентной переменной линейного типа:

$$YP_F = f_L\left(YPL_F\right) = \\ = f_L\left(YP_Б, YP_В, YP_T\right). \quad (7)$$

Аналитически эта зависимость определяется выражением

$$YP_F = 0{,}023\,YPL_F + 0{,}44. \quad (8)$$

График этой зависимости приведён на рисунке 9.

С другой стороны, на графике распределения выделяются 3 максимума, позволяющих сформировать три лингвистические переменные:

НУ – низкий уровень ПЭН в интервале (-19,….-6) YPL_F;

СУ – средний уровень ПЭН в интервале (-8,…,15) YPL_F;

ВУ – высокий уровень ПЭН в интервале (13,…,24) YPL_F.

Это позволило экспертам определить соответствующие функции принадлежности $\mu_{НУ}\left(YPL_F\right)$, $\mu_{СУ}\left(YPL_F\right)$, $\mu_{ВУ}\left(YPL_F\right)$, графики которых приведены на рисунке 10.

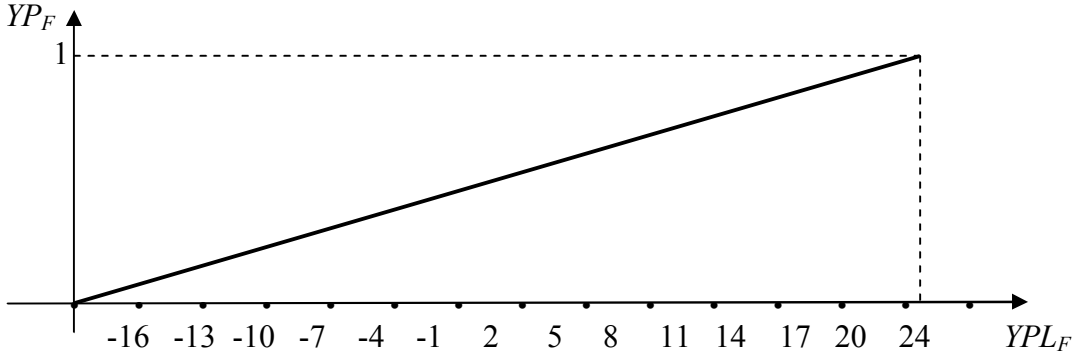


Рис. 9. График уровня психоэмоционального напряжения YP_F в зависимости от YPL_F

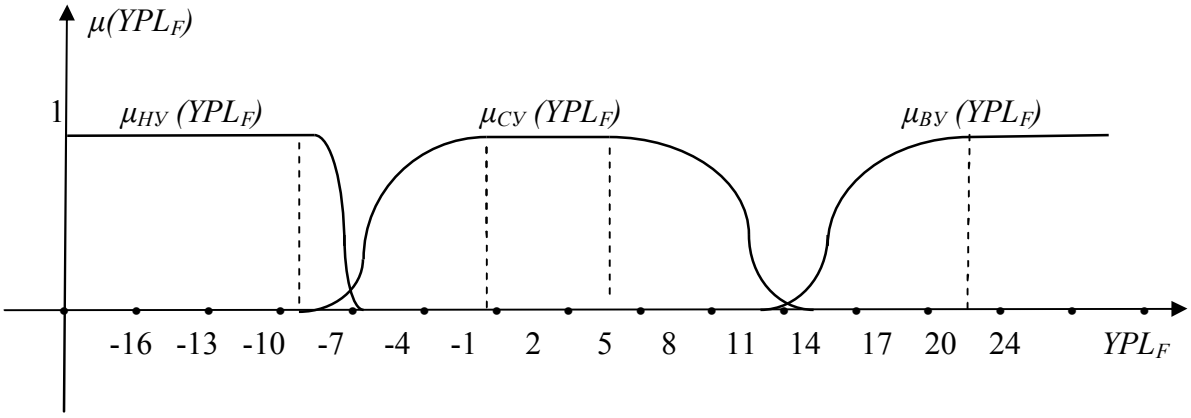


Рис. 10. Графики функций принадлежности с различным уровнем ПЭН

С учетом того, что на появление и развитие заболеваний влияет не только уровень ПЭН, но и его длительность, то кроме текущего уровня требуется учитывать и временной показатель, который при отсутствии объективных средств контроля может быть заменен тестовым опросником, вариант которого для студенческой молодёжи представлен в таблице 2.

Таблица 2

Тестовый опросник на время существования ПЭН

№ п/п	Вопрос	Балл положительного ответа
1	До поступления в ВУЗ у Вас не было ощущения повышенного уровня психоэмоционального напряжения?	0
2	До поступления в ВУЗ Вы в последний год ощущали повышенное психоэмоциональное перенапряжение, но не связываете это с появлением каких-либо заболеваний?	0,5
3	До поступления в ВУЗ Вы последние два года ощущали повышенное психоэмоциональное напряжение, но не связывали это с появлением каких-либо заболеваний?	1
4	До поступления в ВУЗ Вы более двух лет ощущали повышенное психоэмоциональное напряжение, но не связывали это с появлением каких-либо заболеваний?	1,5

Окончание табл. 2

№ п/п	Вопрос	Балл положительного ответа
5	До поступления в ВУЗ Вы в течение года испытывали повышенный уровень психоэмоционального напряжения, и по Вашим ощущениям это привело к появлению заболеваний?	2
6	До поступления в ВУЗ Вы более чем год находились в состоянии повышенного психоэмоционального напряжения, и по Вашим ощущениям это привело к появлению заболевания?	2,5
7	До поступления в ВУЗ средствами объективного врачебного контроля у Вас был зарегистрирован повышенный уровень психоэмоционального напряжения длительностью больше года, но это не было связано с заболеваниями?	2
8	До поступления в ВУЗ у Вас были зарегистрированы заболевания, которые специалисты связывают с высоким уровнем психоэмоционального напряжения или стрессом?	3
9	Обучение в ВУЗе не вызывает у Вас чувства психоэмоционального напряжения?	0
10	Повышенный уровень психоэмоционального напряжения у Вас при обучении в ВУЗе длится более полугода, но меньше года?	3
11	Повышенный уровень психоэмоционального напряжения при обучении в ВУЗе у Вас продолжается от года до двух лет?	4
12	Повышенный уровень психоэмоционального напряжения при обучении в ВУЗе у Вас продолжается от двух до трех лет?	5
13	Повышенный уровень психоэмоционального напряжения при обучении в ВУЗе у Вас продолжается от трех до четырех лет?	6
14	Повышенный уровень психоэмоционального напряжения при обучении в ВУЗе у Вас продолжается больше четырех лет?	7

В таблице 2 баллы распределялись на экспертном уровне с использованием технологии Делфи.

Первые восемь вопросов связаны с довузовским периодом жизни (z_1), а остальные – с периодом обучения в ВУЗе (z_2). Общее число баллов по предлагаемому опроснику определяется по формуле

$$z_p = z_1 + z_2 . \qquad (9)$$

Балльная оценка z_p может быть использована для определения уровня хронического психоэмоционального напряжения *УРН*. В данной работе предлагается два способа расчёта *УРН*.

Первый способ заключается в том, что z_p приводится к шкале [0,…,1], а величина *УРН* определяется выражением

$$УРН = \frac{z_p \cdot УР}{10} . \qquad (10)$$

При этом необходимо иметь в виду, что *УР* и *УРН* имеют различные смыслы по отношению к решаемым задачам и поэтому не могут быть использованы в одних и тех же формулах.

Второй способ основан на использовании моделей Г. Раша, когда в качестве индикаторных переменных используются показатели $YP_Б$, $YP_Т$, $YP_В$ и Z_P, а в качестве латентной переменной – *YPH*.

Фрагмент таблицы индикаторных переменных для вычисления *YPH* с помощью пакета RUMM2020 представлен в таблице 3.

Таблица 3

Значения индикаторных переменных для латентной переменной *YPH*

IP \ *N*	1	2	3	4	5	6	…	28	29	30
$YP_Б$	0,02	0,0	0,09	0,07	0,11	0,21	…	0,88	0,86	0,91
$YP_Т$	0,03	0,01	0,08	0,06	0,12	0,18	…	0,87	0,9	0,89
$YP_В$	0,03	0,00	0,07	0,11	0,09	0,19	…	0,81	0,89	0,87
Z_P	1	1,4	1,9	2,1	1,8	2,7	…	9,9	9,7	10

Результаты обработки данных таблицы 3 пакетом RUMM 2020 представлены на рисунке 11.

Расчетное критическое значение уровня значимости, характеризующее соответствие данного набора индикаторов модели Раша, при числе степеней свободы *df*=8, $\chi^2_{\text{критич.}}$ $\Pr ob = 0,999$. Это больше 0,05 (при доверительной вероятности, равной 0,95). Индекс сепарабельности (*Separation Index*) достаточно высокий и равен 0,995. Коэффициент альфа Кронбаха (*Cronbach Alpha*) также высок и равен 0,997. Мощность (оценка) системы индикаторов (*Power of Test-of-Fit*) оценивается как превосходная (*excellent*).

В процессе работы диалоговой системы RUMM 2020 была получена таблица индикаторных переменных, ранжированная по убыванию значений *Location* (рис. 12).

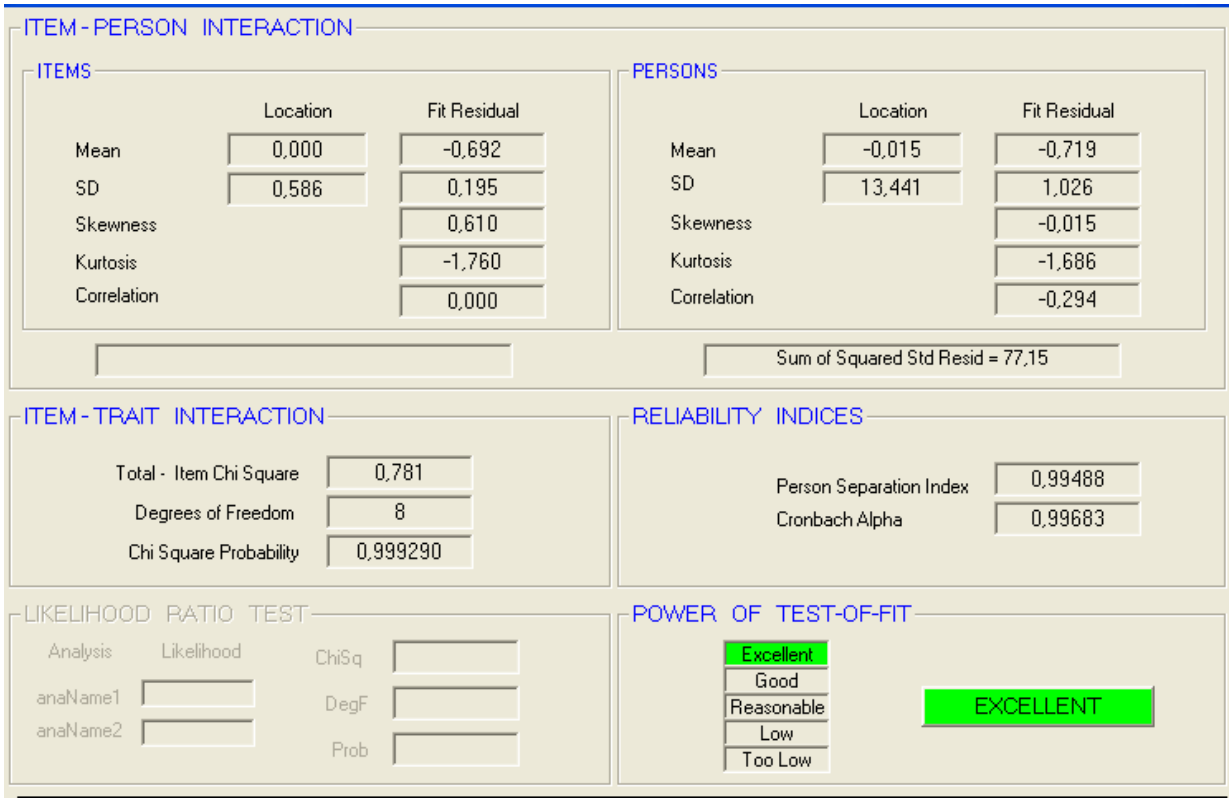


Рис. 11. Скриншот степени соответствия модели Г. Раша

	Seq	Item	Type	Location	SE	FitResid	DF	ChiSq	DF	Prob
1	1	I0001	Poly	0,728	0,450	-0,744	14,25	0,882	6	0,989698
2	2	I0002	Poly	0,162	0,431	-0,762	14,25	0,476	6	0,998117
3	3	I0003	Poly	-0,247	0,423	-0,854	14,25	0,287	6	0,999556
4	4	I0004	Poly	-0,643	0,430	-0,408	14,25	0,882	6	0,989685

Рис. 12. Скриншот таблицы характеристик индикаторных переменных

Из рисунка 12 следует, что все индикаторные переменные имеют показатель $\chi^2_{\text{критич.}}\text{Prob} > 0{,}05$. Это означает, данный набор индикаторов удовлетворяет модели Г. Раша и может быть использован для определения латентной переменной.

Характеристические кривые для индикаторов $YP_Б$, $YP_Т$, $YP_В$ и Z_P приведены на рисунках 14-17.

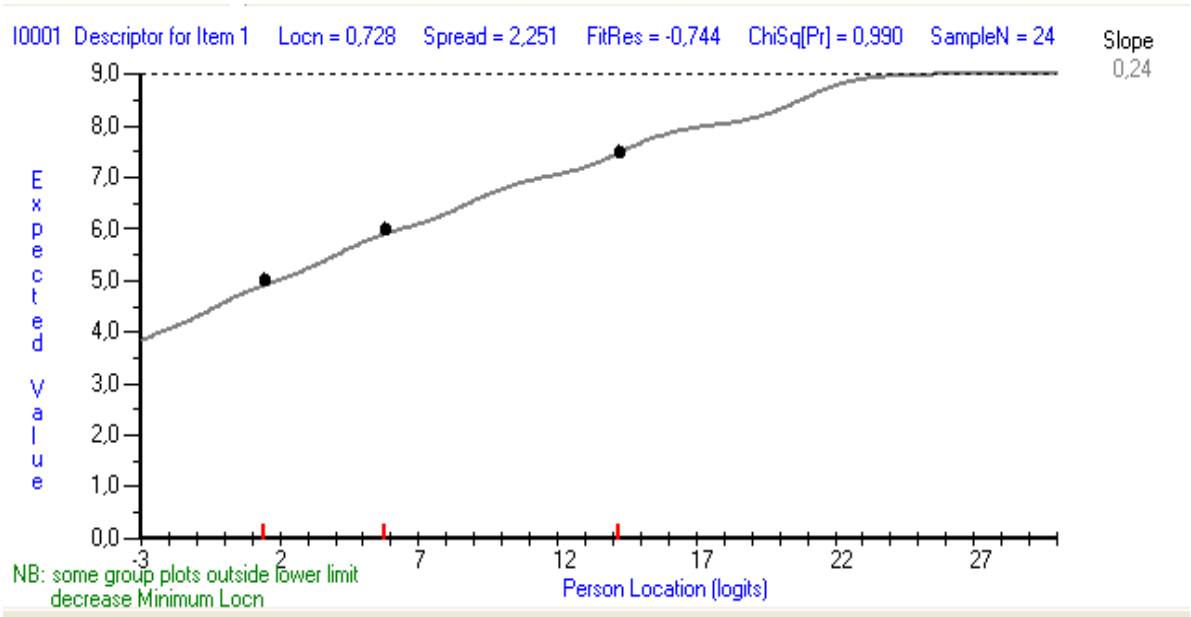


Рис. 14. Характеристическая кривая для индикатора $YP_Б$ информативного признака (индикатора)

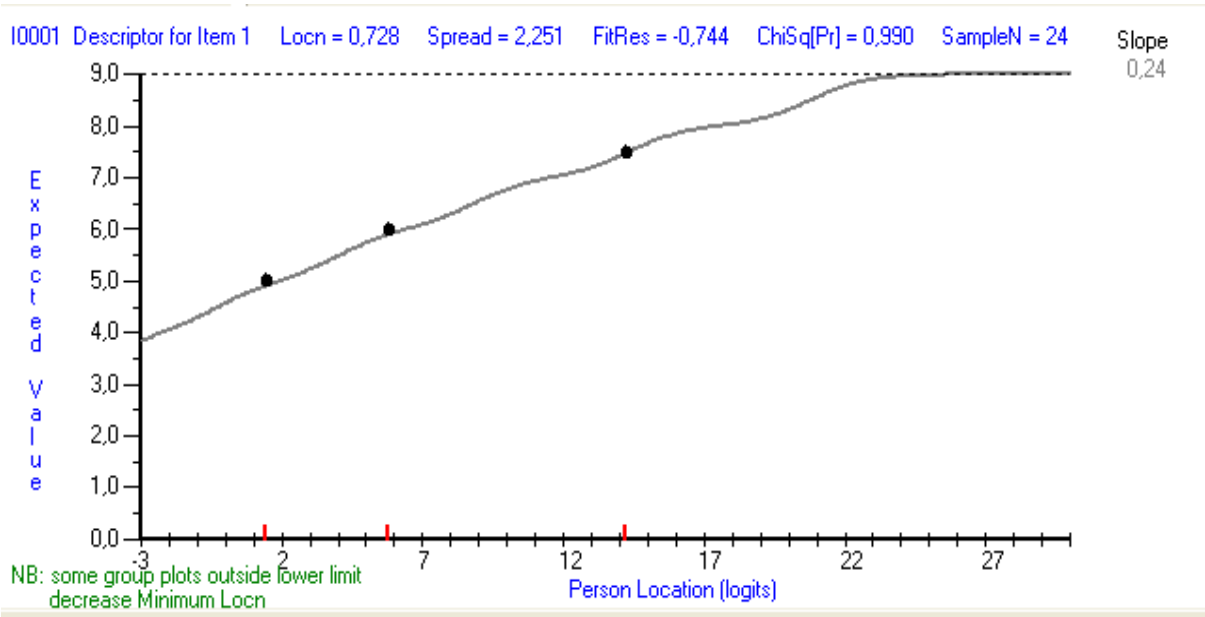


Рис. 15. Характеристическая кривая для индикатора $YP_Т$ информативного признака (индикатора)

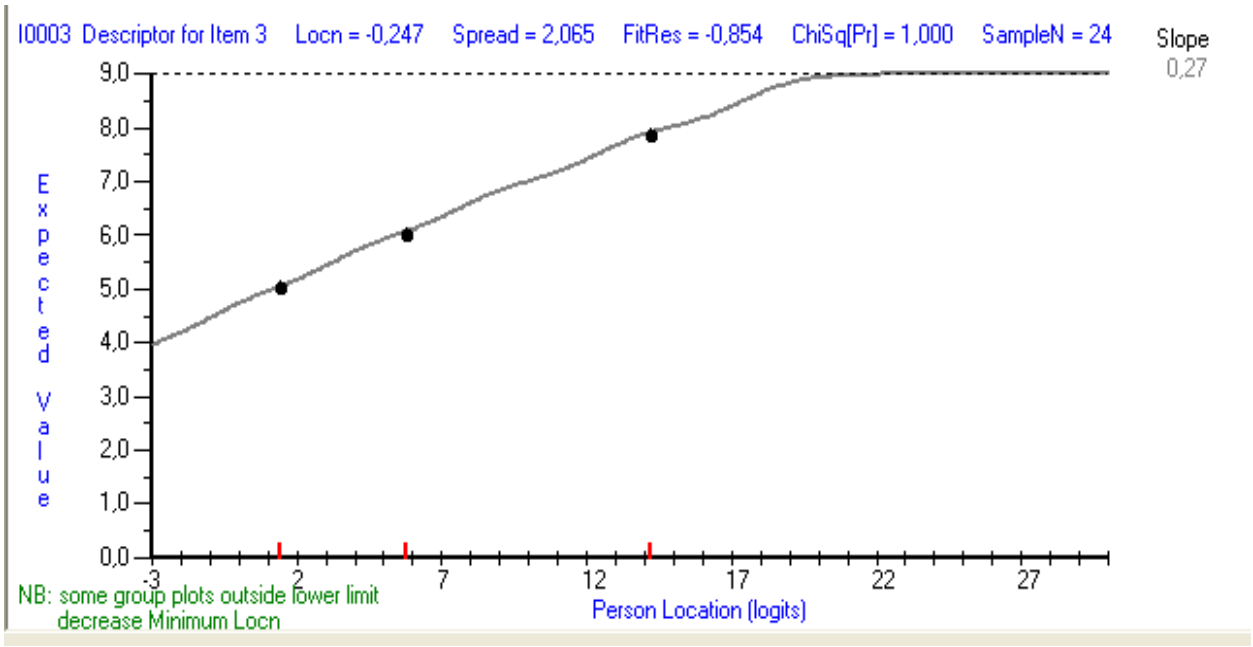


Рис. 15. Характеристическая кривая для индикатора YP_B информативного признака (индикатора)

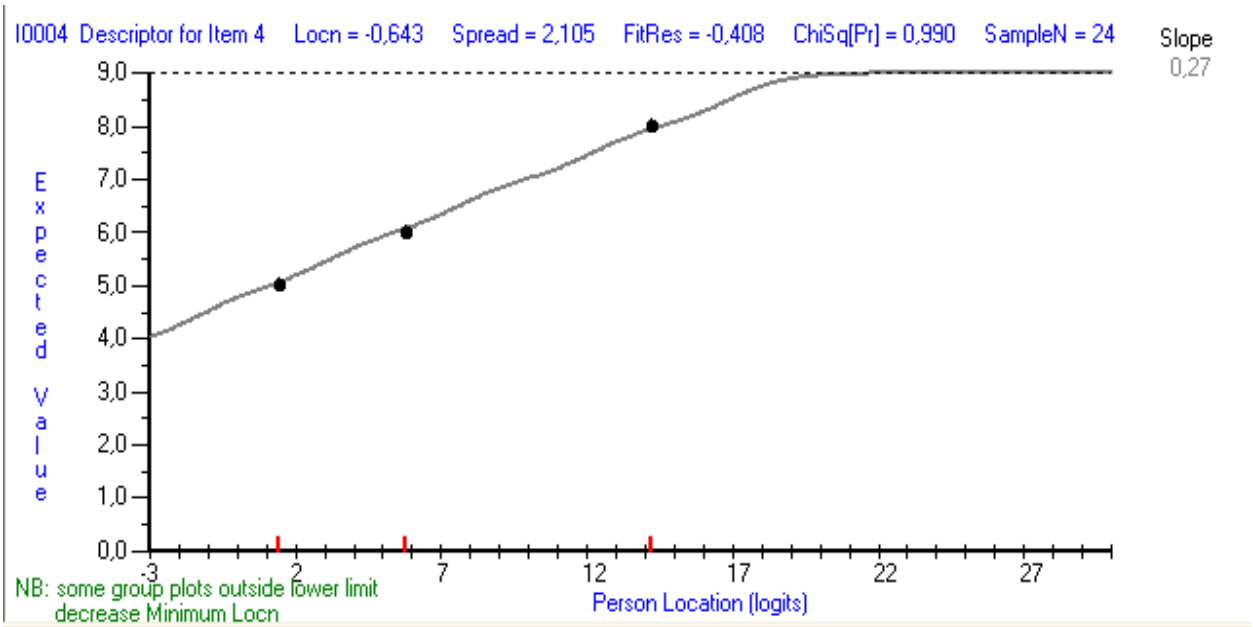


Рис. 16. Характеристическая кривая для индикатора Z_P информативного признака (индикатора)

Анализ приведённых рисунков по точкам, соответствующим «слабым», «средним» и «сильным» уровням, показывает хорошее совпадение данных с теоретическими моделями Г. Раша.

Гистограмма распределения данных по шкале *YPHL* (длительное ПЭН в логитах) приведена на рисунке 17.

Рисунок 17 аналогичен рисунку 8, что позволяет сделать вывод о наличии уравнений связи для определения *YPH*, аналогичных (7) и (8):

$$YPH = fh_L\left(YPHL_F\right) = \\ = f_L\left(YP_Б, YP_B, YP_T, Z_P\right). \quad (11)$$

Аналитически эта зависимость определяется выражением

$$YPH = 0{,}024YPHL + 0{,}46. \quad (12)$$

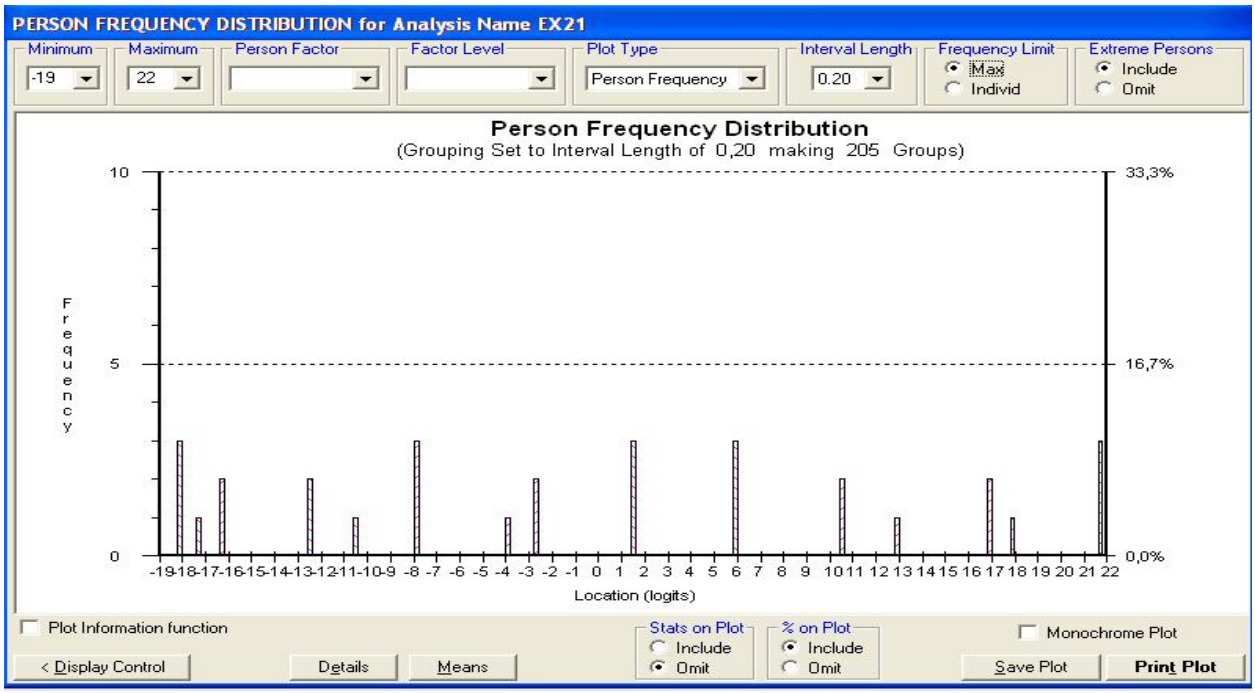


Рис. 17. Скриншот распределения обследуемых по шкале интегрального показателя *YPHL*

Таким образом, в работе показано, что использование теории измерения латентных переменных, в частности модели Г. Раша, позволяет получать математические модели для количественной оценки уровня психоэмоционального напряжения человека.

Заключение

В работе показано, как, используя модель Г. Раша, можно синтезировать нечёткие решающие правила для оценки такой характеристики организма, как уровень его психоэмоционального напряжения. В серии специально проведённых исследований было показано, что числовые значения показателей YP_F и *YPH* могут найти своё применение при решении задач прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики различных заболеваний, при использовании его в качестве дополнительного информативного признака.

Эффективность использования показателя *YPH* для решения задач прогнозирования и ранней диагностики заболеваний исследовалась на таких заболеваниях, как патология желудочно-кишечного тракта, нервной системы, костно-мышечной системы и соединительных тканей. Исследования проводились в экологически неблагоприятном регионе Курской магнитной аномалии [6, 9].

В ходе проведения работы было установлено, что использование такого дополнительного информативного признака, как величина *YPH*, улучшает качество прогнозирования и ранней диагностики исследуемых классов заболеваний на 8±2%, что позволяет рекомендовать полученную математическую модель к практическому использованию.

Список литературы

1. Синтез решающих правил для оценки уровня психоэмоционального напряжения и утомления с использованием двумерных классификационных пространств и векторной алгебры / В.И. Серебровский, А.В. Бойцов, А.Н. Шуткин, С.Н. Кореневская // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – №5(56). – С. 58-63.

2. Бойцов А.В., Филатова О.И., Кореневская С.Н. Классификация функциональных состояний человека с использованием правил нечеткого принятия решений // Оптико-электронные приборы

и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание – 2012: сб. матер. X Междунар. науч.-техн. конф. / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2012. – С. 311-313.

3. Кореневский Н.А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. – 2015. – № 1. – С. 33-35.

4. Кореневский Н.А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2013. – №2. – С. 99-103.

5. Интерактивный метод классификации в задачах медицинской диагностики / Н.А. Кореневский, С.В. Дегтярев, С.П. Серегин, А.В. Новиков // Медицинская техника. – 2013. – №4. – С. 1-3.

6. Кореневский Н.А., Крупчатников Р.А., Аль-Касасбех Р.Т. Теоретические основы биофизики акупунктуры с приложениями в медицине, психологии и экологии на основе нечетких сетевых моделей. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 528 с.

7. Кореневский Н.А., Крупчатников Р.А., Горбатенко С.А. Синтез нечетких сетевых моделей, обучаемых по структуре данных, для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. – 2008. – №2. – С. 18-24.

8. Кореневский Н.А., Руцкой Р.В., Долженков С.Д. Метод прогнозирования и диагностики состояния здоровья на основе коллективов нечетких решающих правил // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2013. – Т.12, №4. – С. 905-909.

9. Прогнозирование и диагностика заболеваний, вызываемых вредными производственными и экологическими факторами, на основе гетерогенных моделей / Н.А. Кореневский, В.И. Серебровский, Н.А. Коптева, Т.Н. Говорухина. – Курск: Изд-во Курск. гос. с-х. ак., 2012. – 231 с.

10. Маслак А.А. Измерение латентных переменных в социально-экономических системах: монография. – М., 2006. – 333с.

11. Титов В.С., Сапитонова Т.Н. Классификация функционального состояния человека и нечёткая оценка его уровня // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – №2-3. – С. 320-324.

12. Филатова О.И. Метод, модели и алгоритм анализа и управления функциональным состоянием человека на основе нечётких гетерогенных правил принятия решений: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.17. – Курск, 2011.

13. Andrich D. Advanced Social and Education Measurement. – Perth: Murdoch Univerity, 2001. – 128 p.

14. Getting Started RUMM 2010/ Rasch Unidimensional Measurement Models. – Pert: RUMM Laboratory Ltd, 2001. – 87 p.

15. Fuzzy determination of the human's level of psycho-emotional / N.A. Korenevskiy, R.T. Al-Kasasbeh, F. Ionescouc, M. Alshamasin, E. Alkasasbeh, A.P. Smith // IFMBE Proceedings. – 2013. – Vol. 40. – P. 213-216.

16. Smit Fuzzy Determination of The Humans Level of Psycho-Emotional / N. Korenevskiy, Riad Taha Al-Kasasbeh, F. Ionescou, M. Alshamasin, Anrew P. // Mega-Conference on Biomedical Enginering: Proceedings of the 4th-international conferece jn the develjpment of biomedical engineering. – Ho Chi Minh City Vietnam, 2012. – P. 354-357.

17. System for Studying Specific Features of Attention and Memory / N.A. Korenevskiy, D.E. Skopin, R.T. Al Kasasbeh, A.A. Kuz'min // Biomedical Engineering Journal. Springer, New York. – 2010. – Vol. 44, N 1. – P. 32-35.

18. Design of network-based fuzzy knowledge bases for medical decision-making support systems / N.A. Korenevsky, S.A. Gorbatenko, R.A. Krupchatnikov, M.I. Lukashov // Biomedical Engineering. – 2009. – Vol. 43, N4. – P. 187-190.

19. Use of an Interactive Method for Classification in Problems of Medical Diagnosis / N.A. Korenevsky, S.V. Degtyarev, S.P. Seregin, A.V. Novikov // Biomedical Engineering. November. – 2013. – Vol. 47, Issue 4. – P. 169-172.

20. Korenevskiy N.A., Krupchatnikov R.A., Gorbatenko S.A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert systems // Biomedical Engineering Journal. – 2013. – Vol. 42, N 2. – P. 67-72.

21. Korenevskiy N. A. Application of Fuzzy Logic for Decision-Making in Medical Expert Systems // Biomedical Engineering. May. – 2015. – Vol. 49, Issue 1. – P. 46-49.

22. Rasch G. Probabilistic models for some intelligence anent tests (Expanded edition, with foreword and afterword bu Benjamin D. Wright). – Chicago: University of Chicago Press, 1980. – 199 p.

23. Smith E.V., Smith M.S. Introduction to Rasch Measurement Theory // Models and Applications. – Marle Grove, Minnesota: JAM Press, 2004. – 689 p.

Получено 22.06.15

N.A. Korenevsky, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

A. N. Shutkin, Candidate of Physico-mathematical Sciences, Voronezh Institute of State fire Service (e-mail: anshutkin@mail.ru)

E. A. Boitcova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk) (e-mail: elena-boitcova@mail.ru)

E.N. Korenevsky, Lecturer, Donezk National Technical University (Ukraina)

USING THE THEORY OF MEASUREMENT OF LATENT VARIABLES TO ASSESS THE LEVEL OF VOLTAGE PSIHOEMOTSIANALNOGO

Discusses the use of the theory of measurement of latent variables based on statistical models G. rush for the tasks of assessing the level of emotional stress.

***Key words**: emotional stress, latent variables, informative sign, fuzzy decision rules.*

УДК 615.47

С.П. Серегин, д-р мед. наук, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

В.В. Федянин, аспирант, Воронежский институт государственной противопожарной службы МЧС России (e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

Н.А. Милостная, канд. техн. наук, ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: nat_mil@mail.ru)

С.В. Петров, канд. мед. наук, докторант, ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ (ОБОСТРЕНИЯ) И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ ОСТРОГО ПИЕЛОНЕФРИТА

В работе рассматриваются вопросы синтеза гибридных нечетких решающих правил для решения задач прогнозирования возникновения или обострения пиелонефрита и определения формы этого заболевания.

***Ключевые слова**: пиелонефрит, прогнозирование, нечеткая логика, уверенность в принимаемом решении.*

***

Пиелонефрит относится к классу достаточно тяжелых заболеваний, приводящих к потере трудоспособности, если не оказывается своевременная и квалифицированная помощь. Поэтому задача своевременного прогнозирования возникновения острого пиелонефрита является весьма актуальной, позволяющей своевременно организовывать эффективные профилактические мероприятия.

Пиелонефрит является воспалительным заболеванием не специфической этиологии. Этиология пиелонефрита многообразна, чаще всего возбудителем являются бактерии, но также известны случаи заболевания, вызванные грибами, вирусами, простейшими.

С математической точки зрения задачи прогнозирования и определения формы острого пиелонефрита являются классификационными с плохо определяемой пересекающейся структурой классов.

В соответствии с рекомендациями [1, 2, 3, 4, 5] для задач с такой структурой данных целесообразно использовать технологию мягких вычислений и, в частности, теорию нечеткой логики принятия решений, адаптированную для классификационных процедур.

В соответствии с рекомендациями [5, 6, 9] задача прогнозирования в данной работе решается как построение нечеткого решающего правила, позволяющего разделять пациентов на два класса:

- ω_0 – риск развития острого пиелонефрита или переход хронического пиелонефрита в фазу активного воспаления отсутствует;
- ω_1 – существует риск заболевания в течение ближайшего года.

Синтез прогностических решающих правил производится в соответствии с общими рекомендациями по синтезу гибридных нечетких правил, разработанными в Юго-Западном государственном университете [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 11, 12, 13, 14].

В качестве информативных признаков выбраны различные факторы риска [8], сгруппированные в следующие блоки.

I. Социально-экономические факторы: x_1 – уровень образования; x_2 – неудовлетворительные жилищные условия (отсутствие горячей воды, неадекватный температурный режим); x_3 – низкий уровень дохода; x_4 – социальный статус.

II. Производственные факторы: x_5 – имеется трудовая занятость; x_6 – работа в условиях «вредного производства»; x_7 – оторванные от дома рабочие (вахтовый метод, дальнобойщики и т.д.); x_8 – работа на улице, в условиях неблагоприятного температурного режима; x_9 – труд, сопряженный с физическим или психологическим стрессом.

III. Поведенческие факторы: x_{10} – низкий уровень санитарной грамотности (информированность в вопросах инфекций нижних мочевых путей, инфекций, передаваемых половым путем); x_{11} – несоблюдение гигиенических навыков; x_{12} – гиподинамия, отсутствие занятий гимнастикой/ спортом; x_{13} – частота несвоевременного опорожнения кишечника в силу обстоятельств (количество дней в неделю); x_{14} – частота несвоевременного опорожнения мочевого пузыря в силу обстоятельств (количество раз в неделю); x_{15} – прием алкоголя в частоте приема не менее 65 мл/сутки в пересчете на спирт в календарном месяце; x_{16} – табакокурение (среднее количество сигарет в день); x_{17} – хроническое переутомление; x_{18} – хронический стресс; x_{19} – промискуитет (количество половых партнеров за календарный месяц); x_{20} – практикуемый незащищенный половой акт; x_{21} – аноректальный половой акт.

IV. Факторы питания: x_{22} – использование «жесткой» воды в качестве питьевой; x_{23} – употребление пережаренной мясной пищи (в количестве дней в неделю); x_{24} – употребление рафинированных углеводов более 60 г/сут (в количестве дней в неделю); x_{25} – употребление острой пищи, кофе (в количестве дней в неделю); x_{26} – регулярность приема свежих овощей и фруктов (в количестве дней в неделю); x_{27} – регулярность приема мясомолочных продуктов из расчета

не менее 1 г на кг веса/сут животного белка (в количестве дней в неделю).

V. Медико-биологические факторы: x_{28} – возраст; x_{29} – хроническая инфекция мочеполовых путей; x_{30} – уретральные инструментальные инвазии в анамнезе; x_{31} – инфекции, передаваемые половым путем, в анамнезе; x_{32} – хронические заболевания толстой кишки, прямой кишки, перианальной области; x_{33} – нерегулярность стула; x_{34} – хронические воспалительные заболевания женских половых органов; x_{35} – наличие фибромиомы матки; x_{36} – использование в качестве контрацепции внутриматочной спирали; x_{37} – наличие абортов в анамнезе; x_{38} – опущение (выпадение) влагалища; x_{39} – стрессовая инконтиненция; x_{40} – патология уретры (стриктуры, гипоспадия, эписпадия); x_{41} – инфравезикальная обструкция (аденома простаты, рак простаты); x_{42} – фимоз; x_{43} – наличие постоянного уретрального катетера, цистостомического свища, пениального мочеприемника, нефростомы; x_{44} – патология мочевого пузыря (микроцист, дивертикур, экстрофия); x_{45} – патология мочеточников (стриктуры, аномалии развития, сдавление извне); x_{46} – гидронефроз; x_{47} – мочекаменная болезнь (наличие камней различной локализации); x_{48} – аномалии развития верхних мочевых путей; x_{49} – операции, инструментальные инвазии на верхних мочевых путях в анамнезе; x_{50} – рак кишечника, женских половых органов; x_{51} – лучевая терапия на область таза в анамнезе; x_{52} – сахарный диабет; x_{53} – хронические заболевания систем и органов; x_{54} – иммунодефициты; x_{55} – беременность.

В ходе проведения разведочного и экспертного анализа была установлена неравнозначность роли информативных признаков в формировании окончательного прогностического решения.

Некоторые признаки, обладая низкой информативностью, но, с другой стороны, простой доступностью в получении, позволяют при комплексном использовании достигать значений коэффициентов уверенности в принимаемых прогностических решениях, значимых для врачебной практики, без определения ряда высокоинформативных, но более трудоемких признаков. Это делает возможной иерархическую логику принятия решений, характерную для медицинской деятельности, когда врач на основании простейших признаков формирует предварительное мнение и, если риски велики, принимает решение о получении дополнительной, более дорогостоящей информации.

При такой тактике принятия решений о прогнозе возникновения острого пиелонефрита согласно рекомендациям [3,6,14] в качестве агрегирующей модели выбрана итерационная формула следующего вида:

$$\begin{aligned} &КУ_{\omega l}[q+1] = КУ_{\omega l}[q] + \\ &+\mu_{\omega l}(x_{q+1})\left[1 - КУ_{\omega l}[q]\right], \end{aligned} \qquad (1)$$

где $КУ_{\omega l}[q]$ – коэффициент уверенности в искомом прогнозе внутри блока признаков;

q – номер признака в блоке;

$\mu_{\omega l}(x_{q+1})$ – функция принадлежности к классу ω_l (l = 0.1), определяемая в соответствии с рекомендациями [7].

В качестве примера ниже приведены аналитические выражения для функций принадлежности с аргументами (базовыми переменными) по признакам x_{24} и x_{25}:

$$\mu_{\omega l}(x_{24}) = \begin{cases} 0, \text{если } x_{24} < 3; \\ 0{,}01x_{24} - 0{,}03, \text{если } 3 \le x_{24} < 7; \\ 0{,}03, \text{если } x_{24} \ge 7. \end{cases}$$

$$\mu_{\omega l}(x_{25}) - \begin{cases} 0, \text{если } x_{25} < 3; \\ 0{,}02x_{25} \quad 0{,}06, \text{если } 3 \le x_{25} < 7; \\ 0{,}04, \text{если } x_{25} \ge 7. \end{cases}$$

Финальная уверенность в классе ω_1 (риск возникновения пиелонефрита высокий) согласно рекомендациям [1, 5, 14] определяется выражением

$$UP[r+1] = UP[r] + \\ + КУ_{\omega l}(r+1)\left[1 - UP[r]\right], \quad (2)$$

где $UP(r)$ – уверенность в появлении острого пиелонефрита по блоку признаков с номером r; $UP(1) = КУ_{\omega 1}(1)$.

Результаты математического моделирования показали, что общая уверенность в прогнозе развития у пациента пиелонефрита по описанной системе признаков достигает величины 0,95 при условии наличия большинства факторов риска с максимальными значениями функции принадлежности. Для наиболее часто встречающихся факторов риска величина KUP достигает уровня 0,81 [8, 9, 10].

Определение формы острого пиелонефрита осуществляется по классам, разбитым на две группы [8,10]. Первая группа подразделяет больных в зависимости от формы воспалительного процесса в почке (ω_s); класс ω_{s1} – серозная форма заболевания; класс ω_{s2} – гнойная форма острого пиелонефрита.

Вторая группа отражает наличие осложняющих факторов течения пиелонефрита (ω_K); класс ω_{K1} – неосложненная форма острого пиелонефрита; класс ω_{K2} – осложненная форма болезни.

В связи с нечеткой природой классов и признаков (симптомов), характеризующих выделенные классы острого пиелонефрита, в качестве основного математического аппарата выбрана нечеткая логика принятия решений с расчетом коэффициентов уверенности в принадлежности к искомым классам.

Перечень информативных признаков описан в работе [8] и разбит на несколько групп:

• данные опроса (боли, общая слабость);

• аналитические данные (длительность заболевания, предшествующая терапия, сопутствующие заболевания и состояния, урологический анализ);

• объективные данные (общее состояние, одышка, частота пульса, артериальное давление, сухость слизистых оболочек, болезненность почек при пальпации, напряжение мышц брюшного пресса, синдром поколачивания по поясничной области);

• лабораторные методы исследования (анализ мочи, общий анализ крови, микробиологические исследования мочи);

• инструментальные методы исследования (УЗИ почек, рентгенологические исследования).

В соответствии с общими рекомендациями по синтезу гибридных коллективов синтеза нечетких решающих правил, разработанных на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета [1, 4, 5, 6, 11, 14], для агрегации функций принадлежности внутри блока признаков к исследуемым классам состояний используется система нечетких правил вида

$$\text{ЕСЛИ } Q_P \text{ то } R_S \quad , \quad (3)$$

где Q_P – нечеткое логическое условие по группе признаков с номером p;

R_S – уверенность в частном диагностическом заключении с номером s.

Финальная агрегация с расчетом коэффициентов уверенности $КУ_{\omega l}$ в классе ω_l осуществляется в соответствии с выражением

$$КУ_{\omega l}[t+1] = КУ_{\omega l}[t] + \\ + R_s(t+1)\left[1 - КУ_{\omega l}[t]\right], \quad (4)$$

где t – номер итерации в расчетах $КУ_{\omega l}$.

Результаты математического моделирования с использованием формул типа (4) показали, что в случае наличия у паци-

ента всех признаков с максимальными величинами функций принадлежности общая уверенность в диагнозе по выделенной системе признаков превышает величину 0,95. Наиболее часто встречающиеся характеристики и их значения признаков дают величину КУ выше 0,88 [8].

Список литературы

1. Кореневский Н.А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. – 2015. – №1. – С. 33-35.

2. Кореневский Н.А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2013. – №2. – С. 99-103.

3. Интерактивный метод классификации в задачах медицинской диагностики / Н.А. Кореневский, С.В. Дегтярев, С.П. Серегин, А.В. Новиков // Медицинская техника. – 2013. – №4. – С. 1-3.

4. Кореневский Н.А., Крупчатников Р.А., Горбатенко С.А. Синтез нечетких сетевых моделей, обучаемых по структуре данных, для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. – 2008. – №2. – С. 18-24.

5. Кореневский Н.А., Руцкой Р.В., Долженков С.Д. Метод прогнозирования и диагностики состояния здоровья на основе коллективов нечетких решающих правил // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2013. – Т.12, №4. – С. 905-909.

6. Синтез комбинированных нечетких решающих правил и медицинских положений с использованием методов разведочного анализа / Н.А. Кореневский, Ф. Ионеску, А.А. Кузьмин, Аль-Р.Т. Касабех // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2009. – № 5. – С. 65-75.

7. Геометрический подход к синтезу нечетких решающих правил для решения задач прогнозирования и медицинской диагностики / Н.А. Кореневский, С.А. Филист, А.Г. Устинов, Е.Б. Рябкова // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2012. – №4. – С. 20-25.

8. Новиков А.В. Методология нечеткого принятия решений и алгоритмизации управления оказанием медицинской помощи больным пиелонефритом: дис. ... д-ра мед. наук. – Курск, 2009. – 232 с.

9. Использование механизмов нечеткой логики принятия решений для оценки состояния человека и животных (на примере прогнозирования и диагностики пиелонефрита): монография / В.В. Серебровский, В.В. Федянин, С.Н. Кореневская, А.В. Серебровский; Курск. гос. с.-х. академия. – Курск, 2015. – 123 с.

10. Современные информационные технологии в урологии: монография / С.П. Серегин, С.Д. Долженков, А.Г. Коцарь, А.В. Новиков, Н.А. Кореневский. – Курск: ОАО «ИПП Курск», 2009. – 364 с.

11. Design of network-based fuzzy knowledge bases for medical decision-making support system / N.A. Korenevskiy, S.A. Gorbatenko, R.A. Krupchatnikov, M.I. Lukashov// Biomedical Engeneering. – 2009. – Vol. 43. – P. 187-190.

12. Use of an Interactive Method for Classification in Problems of Medical Diagnosis / N.A. Korenevskiy, S.V. Degtyarev, S.P. Seregin, A.V. Novikov // Biomedical Engineering. – 2013. – Vol. 47. – P. 169-172.

13. Korenevskiy N.A., Gorbatenko S.A., Krupchatnikov R.A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert system // Biomedical Engeneering. – 2009. – Vol. 42, N 2. – P. 67-72.

14. Korenevskiy N.A. Application of Fuzzy Logic for Decision-Making in Medical Expert Systems // Biomedical Engeneering. – 2015. – Vol. 4. – P. 46.-49.

Получено 30.06.15

S.P. Seregin, Doctor of Medical Sciences, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

V.V. Fedyanin, Post-Graduate Student, Voronezh Institute of State Fire Service EMERCOM of Russia (e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

N.A. Milostnaya, Candidate of Engineering Sciences, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: nat_mil@mail.ru)

S.V. Petrov, Candidate of Medical Sciences, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

MATHEMATICAL MODELS OF RISK PREDICTION, CERTAIN FORMS OF ACUTE PYELONEPHRITIS

The paper deals with the synthesis of hybrid fuzzy decision rules to meet the challenges of forecasting the emergence or exacerbation of pyelonephritis and identify forms of the disease.

***Key words**: pyelonephritis, forecasting, fuzzy logic, confidence in decision-making.*

УДК 614.8:572.18+354.72(091)

Д.О. Замулин, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск)
(e-mail: vitalaxen@mail.ru)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХРОНИЧЕСКОГО ПЕРИОДОНТИТА У ДЕТЕЙ НА ОСНОВЕ РЕГРЕССИОННОГО МЕТОДА

Проведено прогнозирование хронического периодонтита среди детей в зависимости от различных антропогенных загрязнителей воздуха и питьевой воды для улучшения профилактики и снижения данной патологии в г. Белгороде.

***Ключевые слова**: математическое прогнозирование, регрессионные модели, хронический периодонтит у детей.*

***

Хронический периодонтит встречается у 63,79% детей школьного возраста [4]. Периодонтит протекает у детей практически бессимптомно, и его развитие зависит от воздействия факторов окружающей среды [1, 2, 3]. Поэтому важным является осуществление прогнозирования хронического периодонтита для своевременной реализации лечебных и профилактических мероприятий.

В настоящем исследовании выполнено прогнозирование заболеваемости детей хроническим периодонтитом посредством регрессионного метода с учетом антропогенных воздействий.

Для построения математических моделей по прогнозированию заболеваемости детей хроническим периодонтитом от основных атмосферных загрязнителей и содержания микроэлементов в питьевой воде в одном из неблагополучных районов области – в Губкинском районе – проведены первоначально корреляционный, кластерный анализ и метод главных компонент с целью выделения значимых взаимосвязей и сокращения информативного пространства исследуемых признаков.

Корреляционный метод позволил установить достоверные прямые связи между заболеваемостью детей хроническим периодонтитом с превышением ПДК по оксиду углерода (r=+0,453), по неорганической пыли (r=+0,521), по толуолу (r=+0,334), древесной пыли (r=-0,338), диоксиду серы (r=+0,608), фенолу (r=+0,543), аммиаку (r=+0,597), саже (r=-0,402), оксиду азота (r=+0,465), марганцу (r=+0,321), хлористому водороду (r=+0,587), ацетону (r=+0,574). С другими

изученными атмосферными загрязнителями и рассматриваемой патологией установлены как прямые недостоверные (оксид железа, оксид марганца), так и обратные связи (формальдегид, уайт-спирит, бензол).

Оценка межгруппового взаимодействия антропогенных загрязнителей атмосферы и частоты хронического периодонтита среди детей (рис.1) позволила выделить однородные кластеры. Заболеваемость хроническим периодонтитом детей находится в тесной интеграции при достоверном уровне объединения с превышением ПДК по фенолу, формируя 4-й кластер.

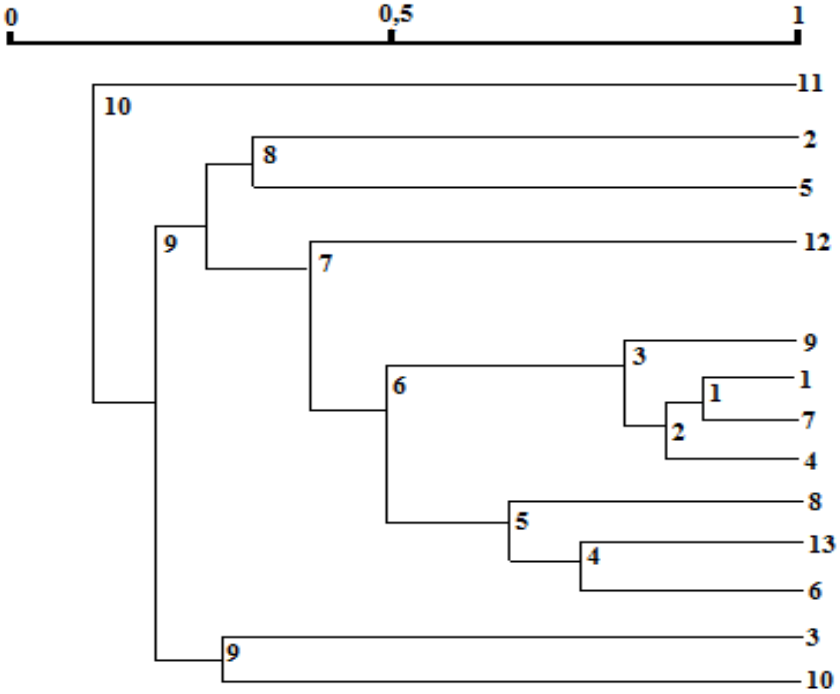


Рис.1. Дендрограмма взаимодействия распространённости хронического периодонтита в детской популяции и загрязнителей атмосферы в 2000-2012 гг.: 1 – оксид углерода; 2 – неорганическая пыль; 3 – толуол; 4 – древесная пыль; 5 – диоксид серы; 6 – фенол; 7 – аммиак; 8 – сажа; 9 – оксид азота; 10 – марганец; 11 – хлористый водород; 12 – ацетон; 13 – хронический периодонтит

Более выраженное взаимодействие имеется между отдельными атмосферными загрязнителями, в частности между оксидом углерода и аммиаком, древесной пылью, образующих 1-й и 2-й кластеры соответственно.

Интеграция других антропогенных загрязнителей атмосферы между собой существенно ниже. Наиболее низкий и недостоверный уровень интеграции свойственен хлористому водороду.

При обработке данных загрязнителей и частоты хронического периодонтита среди детей г. Губкина выделено две главные компоненты с максимальным вкладом первой компоненты – 49,7%. Состав этой нормированной компоненты представлен прежде всего фенолом, сажей, оксидом азота, ацетоном и указывает на снижение заболеваемости детей хроническим периодонтитом при уменьшении содержания в атмосферном воздухе прежде всего фенола, сажи, оксида азота, ацетона. Вторая компонента представлена преимущественно фенолом, аммиаком.

Для прогнозирования заболеваемости хроническим периодонтитом у детей разработаны регрессионные модели, учитывающие основные антропогенные загрязнители.

Регрессионная модель, представленная содержанием в атмосферном воздухе оксида углерода, диоксида серы, неорга-

нической пыли, фенола, имеет следующий вид:

$$y_1 = -2{,}032x_1 - 618{,}431x_2 + 12{,}472x_3 + 4586{,}234x_4 + 12{,}806,$$

где y_1 – заболеваемость детей хроническим периодонтитом;

x_1 – оксид углерода в атмосферном воздухе;

x_2 – диоксид серы в атмосферном воздухе;

x_3 – неорганическая пыль в атмосферном воздухе;

x_4 – фенол в атмосферном воздухе.

Главные нормированные компоненты влияния атмосферных загрязнителей на заболеваемость хроническим периодонтитом детей в Губкинском районе в 2000-2012 гг. представлены в таблице 1.

Таблица 1

Главные нормированные компоненты влияния атмосферных загрязнителей на заболеваемость хроническим периодонтитом детей в Губкинском районе (2000-2012 гг.)

Признаки	ГНК 1		ГНК 2	
	r	%	r	%
1	-0,214	-1,4	+0,287	+0,1
2	-0,362	-4,7	-0,572	-2,3
3	-0,255	-5,2	-0,478	-5,6
4	-0,187	-3,8	-0,234	-13,8
5	-0,434	-4,9	-0,541	-2,7
6	-0,549	-15,2	-0,378	-34,5
7	-0,254	-8,5	-0,356	-21,3
8	-0,427	-11,7	-0,224	-1,9
9	-0,431	-12,0	-0,541	-10,5
10	+0,115	+2,7	+0,208	+2,6
11	+0,009	+3,5	+0,126	+0,3
12	-0,375	-13,3	-0,455	-3,1
13	-0,327	-13,1	-0,271	-1,3
Дисперсия	2,757		1,118	
Процент	49,7		14,3	

Примечание. В таблице приняты те же обозначения, что и на рис.1.

Коэффициент детерминации данной модели составляет 58,42%. Модель адекватна по критерию Фишера ($P<0{,}001$).

При включении в математическую модель других атмосферных загрязнителей получено следующее уравнение регрессии:

$$y_2 = 304{,}561x_5 - 358{,}764x_6 + 10{,}135x_7 + 39{,}728x_8 + 8{,}126,$$

где y_2 – заболеваемость хроническим периодонтитом среди детского населения;

x_5 – содержание в атмосферном воздухе аммиака;

x_6 – оксид азота;

x_7 – ацетона;

x_8 – хлористого водорода.

Коэффициент детерминации модели равен 51,23%.

При корреляционном анализе содержания микроэлементов в питьевой воде и заболеваемости хроническим периодонтитом у детей установлены статистически значимые связи для фторид-ионов (r=-0,332), калия (r=+0,294), железа (r=+0,685), хлорид-ионов (r=+0,476), магния (r=-0,537), сульфат-ионов (r=-0,308), кальция (r=-0,724).

Сокращение признакового пространства микроэлементов питьевой воды, влияющих на развитие хронического периодонтита у детей, показывает высокую степень интеграции содержания железа в питьевой воде и частоты хронического периодонтита в детском контингенте (рис. 2), формирующих 1-й кластер. Взаимодействие содержания количества магния и кальция в питьевой воде при высоком уровне объединения формируют 2-й кластер. Межгрупповое взаимодействие других микроэлементов и ионов питьевой воды с заболеваемостью данной нозологической формой находится на низким уровне, а в ряде случаев – при недостоверном уровне. Особенно низкая интеграция свойственна содержанию калия, опосредованно связанного с другими изучаемыми признаками.

Метод главных компонент выделил две нормированные главные компоненты с различными вкладом в процентах и с разной дисперсией (табл. 2).

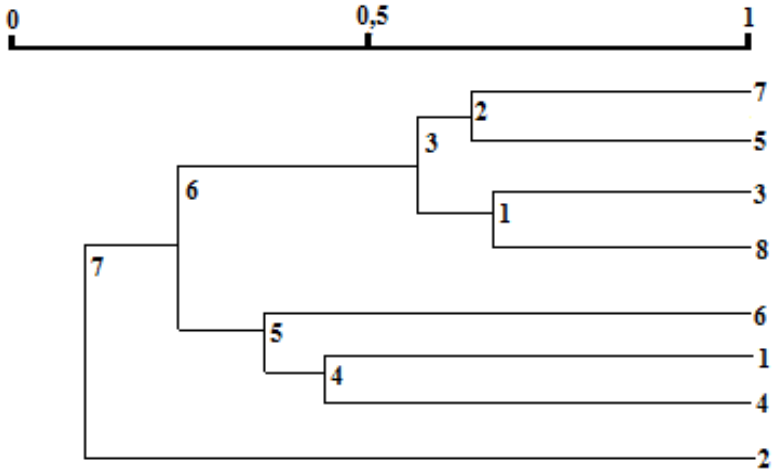


Рис. 2. Дендрограмма взаимодействия распространённости хронического периодонтита в детской популяции и содержания основных микроэлементов в питьевой воде в 2000-2012 гг.: 1 – фторид-ионы; 2 – калий; 3 – железо; 4 – хлорид-ионы; 5 – магний; 6 – сульфат-ионы; 7 – кальций; 8 – острый периодонтит

Таблица 2

Главные нормированные компоненты влияния атмосферных загрязнителей на заболеваемость хроническим периодонтитом детей в Губкинском районе (2000-2012 гг.)

Признаки	ГНК 1		ГНК 2	
	r	%	r	%
1	-0,124	-5,5	-0,297	-8,3
2	-0,257	-6,6	-0,489	-5,7
3	-0,381	-25,7	-0,782	-16,4
4	-0,312	-8,3	-0,416	-11,5
5	-0,406	-7,0	-0,057	-9,4
6	-0,219	-3,6	-0,128	-8,2
7	+0,235	+22,3	+0,369	+17,6
8	-0,413	-21,0	-0,528	-22,9
Дисперсия	2,235		1,706	
Процент	42,8		22,5	

Примечание. В таблице приняты те же обозначения, что и на рис. 2.

Первая нормированная компонента указывает на существенное уменьшение заболеваемости среди детского контингента хроническим периодонтитом при уменьшении содержания в питьевой воде железа и повышении кальция.

Влияние других микроэлементов в составе этой главной компоненты значительно ниже. Вклад данной компоненты максимальный и составляет 42,8 % от общего влияния. Влияние второй главной компоненты несколько ниже, но статистически значимо. Структура второй компоненты свидетельствует, что уменьшение частоты хронического периодонтита у детей произойдет в результате повышения кальция, снижения железа и хлорид-ионов в питьевой воде.

Математическая модель для прогнозирования заболеваемости хроническим периодонтитом в детской популяции от содержания микроэлементов в питьевой воде описывается следующим выражением:

$$y_3 = 162{,}854x_9 - 2{,}537x_{10} + 34{,}647,$$

где y_3 – заболеваемость хроническим периодонтитом;

x_9 – содержание железа в питьевой воде;

x_{10} – содержание хлорид-ионов в питьевой воде.

Коэффициент детерминации данной модели составляет 56,72%, P<0,001.

В зависимости от содержания кальция и магния в питьевой воде получено следующее уравнение регрессии:

$$y_4 = 0{,}945x_{11} + 0{,}009x_{12} + 3{,}906,$$

где y_3 – заболеваемость хроническим периодонтитом;

x_9 – содержание кальция в питьевой воде;

x_{10} – содержание магния в питьевой воде.

Коэффициент детерминации для этой математической модели самый высокий – 64,37% (P<0,001).

Список литературы

1. Гонтарев С.Н. Диверсификация управления заболеваемостью временных зубов на основе геоинформационного, ситуационного анализа, прогнозирования и лечебных инноваций: автореф. дис. … д-ра мед. наук. – Тула, 2008. – 41 с.

2. Максимовский Ю.М., Гринин В.М. Современный взгляд на оценку качества и результативность лечения хронического периодонтита // Эндодонтия today. – 2004. – № 1-2. – С. 16-20.

3. Татаринова В.В., Стати Т.Н. Опыт лечения деструктивных форм хронического верхушечного периодонтита многокорневых постоянных зубов со сформированными корнями у детей и подростков // Проблемы стоматологии. – 2011. – № 1. – С. 56-59.

4. Яковлев А.П. Дискриминантный метод в выявлении больных острым сальпингоофоритом // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – №2-2. – С. 209-215.

5. Chala S., Abouqal R., Abdallaoui F. Prevalence of apical periodontitis and factors associated with the periradicular status // Acta Odontol Scand. – 2011. – № 69(6). – P. 355-359.

Получено 29.06.15

D. O. Zamulin, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk)
(e-mail: vitalaxen@mail.ru)

PROGNOSTICATION OF CHRONIC PERIODONTITIS IN CHILDREN BASED ON A REGRESSION METHOD

Conducted prognostication of chronic periodontitis in children based on different anthropogenic air pollutants and drinking water to improve the prevention and reduction of this disease in Belgorod.

***Key words**: mathematical forecasting, regression models, chronic periodontitis in children.*

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

1. К публикации в «Известиях ЮЗГУ» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2. Объем статьи не должен превышать 8 страниц печатного текста, включая иллюстрации и таблицы.

3 Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

– статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

– рекомендацию кафедры или научно-исследовательского отдела учреждения, в котором выполнена данная работа;

– разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа (обязательно для статей по техническим специальностям, по экономическим – по требованию редколлегии);

– сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);

– электронный носитель (CD-диск).

4. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами, что означает их согласие на передачу Университету прав на распространение материалов статьи с помощью печатных и электронных носителей информации.

5. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

6. **Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается (если автор один и им представлена справка с места учебы).**

7. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

8. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (полужирный, прописные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, литература. Авторы, название, аннотация и ключевые слова приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается краткая аннотация курсивом, отражающая краткое содержание статьи.

Например:

> УДК 004.9:519.8
>
> **А.Л. Иванов**, канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск) (e-mail: ivanov@gmail.com)
>
> **ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ КАДРАМИ ГРАДООБРАЗУЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ**
>
> В статье рассматривается агентная модель прогнозирования обеспеченности кадрами градообразующего предприятия, основанная на структуризации поведения агента и определения влияния его внутреннего представления об окружающем мире на его деятельность.
>
> **Ключевые слова:** агентное моделирование, градообразующее предприятие, событие.

9. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

10. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω, η, β, μ, ω, υ и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (sin, cos, tg и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

11. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

12. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 *dpi* и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы**.

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

13. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы. Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

14. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 50-48-19, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: **http://www.swsu.ru/izvestiya/index.php.**