

# БИОНИКА ИНТЕЛЛЕКТА

ИНФОРМАЦИЯ, ЯЗЫК, ИНТЕЛЛЕКТ

---

№ 1 (88)

2017

---

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**Основан в октябре 1967 г.**

Учредитель и издатель  
*Харьковский национальный университет радиоэлектроники*

Периодичность издания – *2 раза в год*

**СОДЕРЖАНИЕ**

**СТРУКТУРНАЯ, ПРИКЛАДНАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ЛИНГВИСТИКА**

*Широков В.А.* Эволюция как универсальный естественный закон (пролегомены к будущей общей теории эволюции). Часть первая ..... 3

*Чалая Л.Э., Удовенко С.Г., Гринев С.А.* Метод нейросетевой коррекции ошибок в редактируемых электронных текстах..... 15

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ИНФОРМАТИКИ И КИБЕРНЕТИКИ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ**

*Гребенник И.В., Коваленко А.А., Романова Т.Е., Урняева И.А., Шеховцов С.Б.* Задача балансной компоновки цилиндрических объектов с учетом ее комбинаторных особенностей ..... 22

*Хлуд О.М., Романова Т.Е., Стецюк П.И.* О двух задачах оптимальной упаковки гомотетических эллипсоидов ..... 29

*Панишев А.В., Левковский В.Л., Марчук Г.В.* Преобразования в приближенных алгоритмах решения симметричной задачи коммивояжера (СЗК)..... 36

*Міхнов Д.К., Міхнова А.В., Чиркова К.С., Чінілін А.В.* Критерій вибору структури інформаційної системи закладів служби крові ..... 41

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

*Каграманян А.Г., Четвериков Г.Г., Шляхов В.В.* Мультиалгебраические дискретные системы при наличии алгебраической структуры носителя. Сообщение 3 ..... 45

*Литвин О.М., Томанова І.С.* Чисельне розв'язання бігармонічної задачі для випуклого багатокутника за допомогою сплайнів п'ятого степеня на трикутній сітці вузлів..... 50

*Асеев Г.Г.* Оптимальные по парето решения многокритериальной оптимизации задач управления производством и логистики ..... 55

*Кончаковская О.С., Сидоров М.В.* Применение методов нелинейного анализа в математическом моделировании микроэлектромеханических систем ..... 60

*Шергин В.Л., Дереза Э.Э., Передерий В.С., Полиит М.Р.* Оценивание параметра распределения Юла..... 65

*Повзун О.І.* Математичне моделювання режимних параметрів буріння підричних свердловин у гірських масивах..... 69

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ. РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ. БАЗЫ ДАННЫХ И ЗНАНИЙ**

*Дудинова О.Б., Удовенко С.Г.* Компьютерный анализ пространственных изображений с применением марковских моделей ..... 75

*Чалая О.В.* Принцип та метод еволюційної побудови бази знань на основі аналізу логів ІС процесного управління..... 80

*Руденко О.Г., Безсонов О.О., Смерчинський Д.Г.* Розпізнавання емоційного стану людини за допомогою згорткових штучних нейронних мереж ..... 85

*Швороб І.Б.* Підхід до роботи зі слабоструктурованими медичними даними на основі використання ваг ребер для документо-орієнтованої графової бази даних..... 90

*Нечипоренко А.С., Зацеркляний Г.А.* Комп'ютерне планування оперативних втручань на основі CFD-аналізу ..... 96

*Волощук Е.Б., Берест О.М., Гринева Е.Е.* Разработка и реализация прототипа информационно-аналитической системы для медицинских учреждений г. Харькова..... 101

*Мазурова О.А., Семикин М.А., Широкопетлева М.С.* Обучающая система поддержки проектирования баз данных..... 107

*Онищенко К.Г., Афанасьева І.В., Арсеній І.І.* Розробка сервісу для забезпечення дистанційного керування приладами та пристроями розумного дому «smarthouse» із використанням ІОТ рішень ..... 112

Рефераты ..... 117

Об авторах ..... 126

Правила оформления рукописів для авторів науково-технічного журналу «Біоніка інтелекту»..... 129

Приклад оформления статті ..... 130



В.А. Широков

Украинский языково-информационный фонд НАН Украины, г. Киев, Украина

## ЭВОЛЮЦИЯ КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЕСТЕСТВЕННЫЙ ЗАКОН (ПРОЛЕГОМЕНЫ К БУДУЩЕЙ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ЭВОЛЮЦИИ). ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

В первой части работы излагается общая концепция эволюции. Введено и обосновано понятие механизма эволюции. Перечислены шесть основных механизмов эволюции, которые являются предметом дальнейшего анализа. Подчеркивается возможность параллельной эволюции. Сформулирован Основной закон эволюции: сложность эволюционирующей системы всегда растет. Отмеченный закон проиллюстрирован на примерах физического, генетического, нейронного и коммуникационного механизмов. Установлен характер общей темпоральной динамики произвольного эволюционного механизма. Сделан вывод о том, что любой механизм эволюции имеет свой естественный предел роста сложности, обусловленный его системным устройством.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ЭВОЛЮЦИИ, МЕХАНИЗМ ЭВОЛЮЦИИ, СЛОЖНОСТЬ, ОСНОВНОЙ ЗАКОН ЭВОЛЮЦИИ, ТЕМПОРАЛЬНАЯ ДИНАМИКА МЕХАНИЗМА ЭВОЛЮЦИИ

**Shirokov V.A. Evolution as universal natural law (prolegomena to the future general evolution theory).** In the first part of the paper the general concept of evolution is presented. The notion of the evolution mechanism is introduced and justified. Six basic mechanisms of evolution are presented, which are the subject of further analysis. The possibility of parallel evolution is underlined. The Basic Law of Evolution is formulated: the complexity of the evolving system always grows. This law is illustrated by examples of physical, genetic, neural and communicational mechanisms. The character of the general temporal dynamics of any evolutionary mechanism is established. It is concluded that any evolutionary mechanism has its own natural limit of complexity growth caused by its system construction.

GENERAL EVOLUTION THEORY, EVOLUTION MECHANISM, COMPLEXITY, BASIC LAW OF EVOLUTION, TEMPORAL DYNAMICS OF THE EVOLUTION MECHANISM

**Широков В.А. Еволюція як універсальний природний закон (пролегомени до майбутньої загальної теорії еволюції).** У першій частині праці викладено загальну концепцію еволюції. Введено і обґрунтовано поняття механізму еволюції. Наведено шість основних механізмів еволюції, котрі є предметом подальшого аналізу. Підкреслюється можливість паралельної еволюції. Сформульовано Основний закон еволюції: складність еволюціонуючої системи завжди зростає. Відзначений закон проілюстровано на прикладах фізичного, генетичного, нейронного і комунікаційного механізмів. Установлено характер загальної темпоральної динаміки для довільного еволюційного механізму. Зроблено висновок про те, що будь-який механізм еволюції має свою природну границю зростання складності, обумовлену його системним улаштуванням.

ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ЕВОЛЮЦІЇ, МЕХАНІЗМ ЕВОЛЮЦІЇ, СКЛАДНІСТЬ, ОСНОВНИЙ ЗАКОН ЕВОЛЮЦІЇ, ТЕМПОРАЛЬНА ДИНАМІКА МЕХАНІЗМУ ЕВОЛЮЦІЇ

«Можешь ли ты вытащить левиафана крюком?  
Или язык его веревкой, тобой забрасываемой?»

*Книга Иова 40:20 (Син.)*

«...Ибо искусством создан тот великий Левиафан, который называется Республикой, или Государством (Commonwealth, or State), по-латыни — Civitas, и который является лишь искусственным человеком, хотя и более крупным по размерам и более сильным, чем естественный человек, для охраны и защиты которого он был создан».

*Т. Гоббс. «Левиафан»*

### Введение

В подзаголовке статьи мы употребили слово «пролегомены», которое происходит от греческого «prolegomena» и означает предисловие, предварительное введение в ту или иную науку, разъясняющее ее предмет и методы; предварительное рассмотрение совокупности проблем, решение которых является условием дальнейшего развития обсуждаемой отрасли знаний. Этот термин с легкой руки Иммануила Канта, опубликовавшего в 1783 работу «Пролегомены ко всякой будущей метафизике, могущей появиться как наука», был введен им в научный обиход как попытка изложить в более простой и ясной форме идеи его же книги «Критика чистого разума» (1781), и стал элементом философской традиции. Мы полагаем уместным употребление этого термина в данном случае, поскольку предмет данной статьи — общая теория эволюции, которой сегодня нам видятся лишь контуры, по-видимому

и станет некоей «будущей метафизикой, могущей появиться как наука».

Что касается собственно предмета данного исследования, то автор уже довольно давно ощущает необходимость в некоей достаточно универсальной концептуальной схеме, которая позволила бы хотя бы в общих чертах обозреть устройство Мира с некоторой единой позиции. Причем Мира именно с большой буквы, ибо в данном случае мы предполагаем говорить обо всём Мироздании в целом. Разумеется, такая амбициозная — как сейчас любят говорить — задача вполне способна вызвать здоровый скепсис у просвещенного читателя. Тем более, что автор, как это следует из дальнейшего изложения, рискует делать некие предсказания — занятие, как известно, совершенно неблагоприятное. Ибо опыт вполне определенно свидетельствует, что «история опережает мышление», и уже завтрашний день, как правило, опровергает предположения даже дня сегодняшнего. Мы прекрасно помним различные пророчества о кажущихся «закатах цивилизации», «концах истории» и т. п., которые на самом деле оказались не столько концами, сколько началами. С другой же стороны — «Но поди ж ты — и это только кажется!», как выразился Франц Кафка в своей знаменитой притче «Деревья». Ведь в истории, несомненно, имели место и закаты и концы, равно как и борьба со всякими концами и началами...

Тем не менее, несмотря на колоссальный разброс мнений, убеждений и предубеждений, касающихся оснований мироустройства, большинство мыслящих людей сейчас пребывает в таком настроении, что мир, в котором мы живем, каким-то таинственным образом развивается, эволюционирует, а постоянно обновляющиеся данные науки не опровергают, а лишь подтверждают данное настроение.

Но вот в каком направлении происходит эта эволюция, каким законам она подчиняется и вообще, существуют ли такие общие закономерности, действующие на всём, так сказать, диапазоне Мироздания, и к чему в конце концов это может привести? — с ответом на эти вопросы дело обстоит гораздо сложнее.

Автор исходит из внутреннего убеждения, что Мироздание не случайно. Однако не в том смысле, что в нём отсутствуют случайности (совсем наоборот — мир вообще не может существовать без случайностей), а в том, что весь объем Универсума — от его Начала (и даже перед) до самого Конца (и даже после) — управляется некими общими закономерностями, которые проявляются в формах, специфичных для каждого эволюционного этапа, каждой фазы эволюции. Более того, автор собирается обосновать это утверждение, чему будет посвящено последующее изложение.

Разумеется, такая постановка задачи диктует необходимость рассматривать весь Мир в его целостности — «без исключений и изъятий» — Мир с большой буквы, что создает для автора массу проблем, как принципиального, так и технического характера.

В частности и в первую очередь, сказанное касается методологии нашего исследования. Поскольку его фактический диапазон охватывает всё мироздание, мы предупреждаем читателей, что не следует ожидать от него (исследования) чересчур большой точности. В данном случае мы полагаем слишком большую точность и детализацию даже неуместной. В этой связи мы декларируем в качестве основного методологического принципа, которому мы предполагаем следовать в данной работе, так называемую «Презумпцию нулевого приближения», полагая, что любая теория хорошо работает лишь в «нулевом приближении». Не стоит требовать от теории такой точности, которая не является релевантной рассматриваемой проблеме. Образно говоря, когда за деревьями становится не видно леса. В ходе нашего исследования мы обсудим целый ряд аспектов и направлений, над которыми трудятся десятки, а то и сотни специализированных научных институтов и тысячи выдающихся специалистов. Они обладают о соответствующих предметах такими объемами знаний, которые не доступны автору при самом большом его желании и добросовестности. Вместо этого автор пользуется лишь самыми элементарными сведениями из соответствующих предметных областей — в духе задекларированной им презумпции

нулевого приближения. Оправданием такого исследовательского модуса, равно как и ответом будущим критикам служит то обстоятельство, что любые уточнения специалистов к нашим утверждениям на самом деле лишь усиливают наши позиции. Это парадоксальное на первый взгляд утверждение становится очевидным и даже почти банальным по мере углубления в суть феноменологии эволюционных процессов, что станет ясным из последующего изложения.

### 1. Исходные понятия и основные постулаты общей концепции эволюции

Современная эпоха является эпохой перманентных кризисов. В мире постоянно возникают очаги напряженности, вооруженные столкновения, локальные войны, грозящие перерасти в глобальные вооруженные конфликты и т. п. Бичом последнего времени стал терроризм, с которым отчаянно борются (или делают вид) мировые державы. Огромный вклад в общую мировую нестабильность вносят кризисы, связанные с мировой финансовой системой. Так, в период с 1970 по 2013 годы наблюдалось более 400 больших банковских, валютных или долговых кризисов. Особую озабоченность вызывают экологические и техногенные катастрофы.

Перечень кризисов, сотрясающих мир, можно было бы значительно расширить. Состояние глобализированного современного мира можно охарактеризовать формулой «Борьба всех против всех». Общей особенностью этих кризисных явлений является их кажущаяся немотивированность. По крайней мере, внешние мотивы конфликтов при их зарождении почти всегда выглядят недостаточными для их разрастания, а в будущем, по прошествии времени, нужного для их осмысления, и действительно оказываются таковыми. Остается констатировать, что всемирный Левиафан, упомянутый в эпиграфе к данной работе и призванный обеспечивать соблюдение Мирового Порядка, всё хуже справляется со своими обязанностями, а роль глобальных мировых институтов становится всё более декоративной.

Мы убеждены, что для того, чтобы понять причины современных кризисов, необходимо осознать и получить внутреннюю уверенность в том, что они являются следствием **общих законов эволюции мира и не могут быть объяснены вне этих законов.**

В предыдущем абзаце мы выделили фрагмент, касающийся общих законов эволюции мира. Однако существуют ли вообще эти законы и если да, то сформулированы ли они наукой и в каком состоянии сейчас находится то, что мы выше назвали общей теорией эволюции? Автор время от времени набирает в поисковике Google словосочетания «общая теория эволюции» и «general evolution theory», но большого удовлетворения от реакции системы на эти запросы он, к сожалению, не получает. Несмотря на то, что Google выдает по



данным запросам колоссальные объемы информации (в сноске<sup>1</sup> мы приводим данные, полученные 21 июля 2017 года), анализ этих данных показывает, что львиная доля публикаций посвящена тем или иным аспектам модернизации теории биологической эволюции Дарвина-Уоллеса, имеющей, по нашему мнению весьма опосредованное отношение к общим проблемам эволюции. Лишь очень небольшое число публикаций дает, как нам представляется, лишь *отчасти правильное направление* изложения данной проблематики. Но не более того. Эти работы мы упомянем ниже.

Вследствие такого положения дел нам не остается ничего другого как сформулировать, так сказать, *ab initio* – из первых принципов – собственную теорию эволюции мира, введя основные понятия и базовые параметры, описывающие эволюцию вместе с их интерпретацией и иллюстрацией на конкретных примерах. Следует отметить, что целый ряд положений нашей работы носит декларативный и фрагментарный характер. Это объясняется тем обстоятельством, что ввиду исключительно большого объема исследования, охватывающего всё мироздание в целом, подробно остановиться на отдельных деталях в рамках журнальной статьи не представляется возможным. Мы надеемся, что этот недостаток будет устранен хотя бы частично в последующих более объемных публикациях.

Итак, к делу.

Мы исходим из убеждения, что Мир эволюционирует. Это убеждение мы квалифицируем как «Презумпцию развития» (автору нравится слово «презумпция») и далее **будем рассматривать эволюцию как одно из основных свойств Мира, возможно даже – вообще основное.**

Эволюция здесь является ключевым словом, но вот что такое эволюция? Процесс эволюции можно схематически изобразить так:

??... → ... → ... → ... Откуда движемся?

и прокомментировать следующими «наивными вопросами»:

- Куда движемся?
- Как движемся?
  - Почему?
  - Зачем?,

на которые, впрочем, не так просто дать вразумительный ответ.

Имеется и немало попыток дать, так сказать, «рефлексивные» определения данного понятия.

Большинство из них сводится примерно к следующему: «Эволюция – это процесс последовательных изменений в системе, которые приводят ее к качественно новому состоянию развития (прогресса)».

Автор не имеет ничего против такого рода определений, однако отмечает, что критерии прогресса не очевидны и достаточно неопределенны, а их уточнения, по сути, делают данные определения тавтологией. Мы полагаем, что «эволюция» является фундаментальным, первичным понятием (ср. с понятием множества в математике), которому строгое определение дать невозможно. Но можно привести примеры, дать некоторые пояснения, исследовать её свойства и установить закономерности, чем мы и предполагаем сейчас заняться.

Основным понятием общей теории эволюции мы полагаем понятие «МЕХАНИЗМА ЭВОЛЮЦИИ». Краткое содержание данного понятия раскрывается в следующих утверждениях:

1. Эволюция мира осуществляется в определенных *дискретных* формах. Эти дискретные формы мы и будем называть «механизмами эволюции».

2. Каждый *механизм эволюции* характеризуется определенным, специфичным для него комплексом материально выраженных признаков, позволяющих его индивидуализировать и выделить среди других механизмов.

3. Однако все *механизмы* имеют некоторые общие свойства, что позволяет их типизировать и отнести к одному классу явлений, а именно – к классу «ЭВОЛЮЦИЯ»

В данной работе мы выделяем и будем рассматривать (с разной степенью детализации) следующие **эволюционные механизмы**:

1. ФИЗИЧЕСКИЙ.
2. ХИМИЧЕСКИЙ.
3. ГЕНЕТИЧЕСКИЙ.
4. НЕЙРОННЫЙ.
5. КОММУНИКАЦИОННЫЙ.
6. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ,

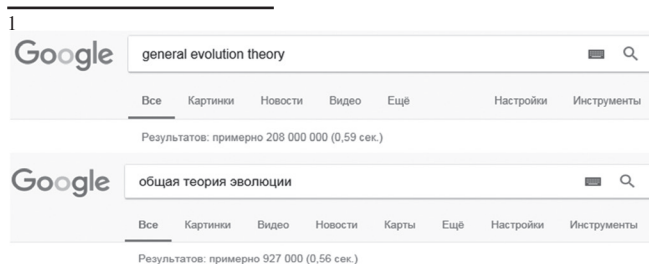
состоящий из следующих:

- 6.1. Производственно-потребительский.
- 6.2. Производственно-обменный.
- 6.3. Производственно-финансовый
- 6.4. Производственно-финансово-информационный
- 6.5. Производственно-финансово-информационно-сетевой

Экономические

Отметим, что каждый из перечисленных механизмов обладает своей «тонкой структурой». Например, для Физического механизма мы выделяем 10 фаз, которые будут указаны ниже. Пока что мы явно перечислили лишь отдельные этапы Производственного механизма, которых мы на данный момент насчитываем 5 и которые во второй части работы будут проанализированы более подробно.

Исчерпывает ли приведенный список множество всех механизмов эволюции? Ответ, очевидно, отрицательный. Мы считаем, что это множество вообще





## 2. Колмогоровская мера сложности и ее интерпретации<sup>3</sup>

Исходя из соображений научной полноты и адекватности позволим себе привести определение понятия сложности по Колмогорову, следуя его знаменитой работе «Три подхода к определению понятия количества информации»<sup>4</sup>. Данное определение мы сопроводим нашей интерпретацией и комментариями, отражающими имплицитно содержащиеся в колмогоровской теории сложности отношения «субъект – объект» и «форма – содержание».

В данной работе мы также изложим некоторые соображения касательно общих системно-методологических и естественнонаучных оснований исследования «сложных» процессов и объектов.

Итак, рассмотрим некоторое счетное множество  $X = \{x\}$ . Предположим, что существует взаимно однозначное соответствие между множеством  $X$  и множеством  $D$  двоичных слов, начинающихся с единицы<sup>5</sup> – иными словами, пусть задано биективное отображение:

$$n: X \rightarrow D, \quad (1)$$

такое, что каждому  $x \in X$  однозначно отвечает некий  $d = n(x)$ ,  $d \in D$ , и наоборот. Будем считать, что:

1.  $n(x)$  – общерекурсивная функция на  $D$ . Обозначим через  $l(d)$  длину двоичного слова  $d \in D$ , то есть число нулей и единиц, в нем содержащихся. Тогда

$$l(n(x)) = l(x) + C, \text{ где } C \text{ – некая константа.}$$

2. Существует однозначное отображение

$$\chi: X^2 = X \times X \rightarrow X$$

такое, что для  $\forall x \in X, y \in X \exists z \in X$ , что  $z = \chi(x, y) \equiv (x, y)$  и  $n(z) = n(x, y)$  – общерекурсивная функция от  $n(x)$  и  $n(y)$ , причем:

$$l(x, y) \leq C_x + l(y),$$

где константа  $C_x$  зависит только от  $x$ . Полагаем изоморфизм (1) установленным, так что множество  $X$  также рассматриваем как множество двоичных слов. Допустим, что существует частично рекурсивная функция  $\varphi(p, x)$ , ставящая в соответствие двоичному слову  $x$  двоичное слово  $y$ , причем  $p \in D$  интерпретируется как алгоритм (или программа), „перерабатывающая”  $x$  в  $y$ :

$$p: x \rightarrow y, \quad (2)$$

а  $\varphi$  представляет при этом метод (язык) программирования. Без потери общности полагаем, что  $p$  для данного  $x$  задается неким двоичным словом. Обозначим:

$$K_\varphi(y|x) = \begin{cases} \min_p l(p), & \text{если } \varphi(p, x) = y \\ \infty, & \text{если не существует конечного } p \\ & \text{такого, что } \varphi(p, x) = y. \end{cases} \quad (3)$$

<sup>3</sup> При первом чтении данный раздел можно опустить.

<sup>4</sup> А.Н.Колмогоров. Три подхода к определению понятия количества информации. В кн. Теория информации и теория алгоритмов. – М.: Наука, 1987. – С. 220.

<sup>5</sup> Множество  $D$  двоичных слов, начинающихся с единицы, состоит из элементов: 1, 10, 11, 100, 101, 110, 111 и так далее.

Таким образом,  $K_\varphi(y|x)$  является длиной минимальной (самой короткой) программы  $p$ , переводящей  $x$  в  $y$  при заданном методе программирования  $\varphi$ .

Эта величина и называется **сложностью у относительно x при данном  $\varphi$** .

На интуитивном уровне понятно, что «сложность у относительно x при данном  $\varphi$ » связана с некоей неоднородностью объекта  $x$ , то есть с тем, насколько нерегулярно размещены в нем нули и единицы, насколько это распределение неоднородно, не может быть существенно упрощено и, значит, не допускает более короткого описания  $\varphi(p, x) = y$ . Разумеется, зависимость величины сложности от языка программирования  $\varphi$  является недостатком описанного метода, но есть теорема<sup>4</sup>, утверждающая существование „наилучшего” метода программирования  $A$  такого, что для любой частично рекурсивной функции  $\varphi$  справедливо неравенство:

$$K_A(y|x) \leq K_\varphi(y|x) + C_\varphi, \quad (4)$$

где постоянная  $C_\varphi$  зависит лишь от  $\varphi$  и не зависит от  $x$  и  $y$ .

Величину  $K_A(y) \equiv K_A(y|1)$ , „нормированную” относительно единичного элемента  $x = 1$ , естественно считать сложностью элемента  $y$ .

Замечательно, что в модели Колмогорова сложность связана с информацией. А именно, количество информации в объекте  $x$  относительно объекта  $y$  определяется как разность:

$$I_A(x|y) = K_A(y) - K_A(y|x). \quad (5)$$

Последняя формула и определяет меру информации – так называемую алгоритмическую меру информации Колмогорова.

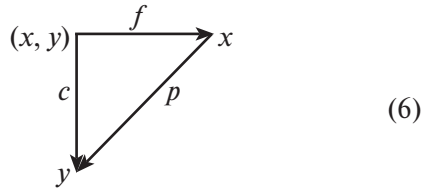
Информационная мера Колмогорова весьма поучительна. Ее определяющим свойством является относительность. Действительно, количество информации, которую содержит некий объект, мы можем определить, лишь сравнивая его свойства со свойствами другого объекта, который нам достаточно хорошо знаком.

Обращает на себя внимание свойство «субъектности» мер сложности и информации Колмогорова. Ведь они в явном виде содержат некий оператор, программу – «субъект», который обеспечивает сравнение свойств объектов  $x$  и  $y$ . Мы еще вернёмся к обсуждению этого свойства.

Поскольку для простоты изложения, как это принято в математике, оба объекта представлены двоичными числами (то есть «субстанциально» однородными объектами), постановка задачи сравнения свойств  $x$  и  $y$  не представляется чересчур «сложной». Картина, однако, может кардинально измениться, если в качестве  $x$  и  $y$  будут выбраны объекты различной субстанциальной природы.

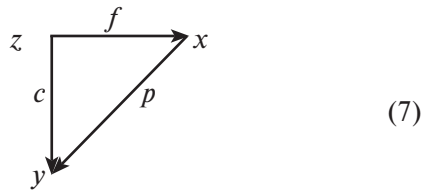
Формулы (3)–(5) и весь описанный подход определения информации через алгоритмическую сложность могут быть проинтерпретированы несколько иным образом. Рассмотрим треугольную диаграмму:





где  $x$  и  $y \in X$ ; элемент  $(x, y) \in X^2$ , причем благодаря существованию отображения  $\chi : X^2 \rightarrow X$ ,  $\chi(x, y) = z$ ,  $z \in X$ . В диаграмме (6) отображения  $f$  и  $c$  осуществляют проекции элемента  $(x, y)$  на первый и второй сомножители, соответственно, причем справедливыми остаются формулы (3)–(5) и интерпретация сложности и информационной меры.

Допустим, что объект  $z$ , который до этого представлял образ декартова произведения  $(x, y)$  при отображении  $\chi$ , на самом деле является самостоятельным, в определенной мере независимым от  $x$  и  $y$  объектом внешнего мира. Это допущение позволяет построить такую диаграмму:



где  $z \in Z$ ,  $Z$  – множество-источник объектов  $z$ ; при этом  $x \in X$ ,  $y \in Y$ . Тогда отображения  $f$  и  $c$  определяют некие интерпретации объекта  $z$ , и, кроме того, отображение  $p$  интерпретирует  $x$  через  $y$ . Естественно допустить, что объект  $x$  отражает «формальные» свойства объекта  $z$ , при условии, что отображение  $f$  содержит в себе некий аналог «коммуникационной среды» и «перцептивно-сенсорного аппарата», а  $y$  – его «содержательные» свойства, причем связь между «формой» и «содержанием» берет на себя  $p$ . Требование минимальности  $p$  здесь совершенно естественно, ведь «истолкование» формы (а его результатом, собственно, и является содержание) не должно содержать «лишних», случайных относительно  $x$  (а также и  $z$ ) элементов. Построенная таким образом конструкция, основанная на тройке объектов  $(z, x, y)$  и тройке отображений  $(f, c, p)$ , формирующая диаграмму (7), допускает естественную интерпретацию как комплекса, являющегося носителем (и, по сути, реализующего) отношение «форма-содержание». Итак, отношение «форма-содержание» таким своеобразным способом оказывается «зашифрованным» в алгоритмической теории сложности и информации Колмогорова.

Наиболее фундаментальной здесь является идея конструктивного объекта и его описания, что выражено в формуле (2):  $p: x \rightarrow y$ . Поскольку исследуемые нами объекты, эволюцию которых мы изучаем, являются реальными сущностями, обладающими собственной онтологической природой, то свойство конструктивности уже с самого начала есть некоторым упрощением, огрублением действительности, неким лишь приблизительно верным представлением об этих объектах. Такая

ситуация является типичной для любого исследования: наука изучает свои объекты не в их собственных ипостасях, а всего лишь на более или менее адекватных моделях. И свойство конструктивности, которое мы приписываем исследуемым объектам и явлениям, является самым первым допущением, базовым предположением, позволяющим дальнейшее развитие теории.

Следующий шаг – построение адекватного описания изучаемого объекта, позволяющего осуществить его идентификацию и воспроизведение его свойств. Попытаемся установить, какими свойствами должен обладать оператор (отображение)  $p$ , реализующий построение описания объекта, которому мы предписали свойство конструктивности.

Данный оператор обязан иметь в своем составе некий аналог перцептивно-сенсорного аппарата, который позволяет ему воспринимать свойства наблюдаемого объекта и отличать его от других объектов. Воспринятые таким образом свойства должны затем фиксироваться в среде внутренних состояний данного оператора и подвергаться неким аналитическим и синтетическим процедурам, результатом которых является конструктивный (фактически – формальный) объект, представляющий выражение некоторой, вполне определенной комбинации внутренних состояний оператора. Он отождествляется с описанием исходного наблюдаемого объекта.

В теории сложности и информации Колмогорова оператор, осуществляющий переработку воспринимаемых им свойств наблюдаемого объекта в своё внутреннее представление, также представляется в форме некоторого конструктивного объекта. Как таковой, он также приобретает форму некоторого описания, а конкретно – слова в алфавите внутренних состояний (у Колмогорова они маркированы двоичными последовательностями). Среди возможных описаний выбирается минимальное – с учётом некоторых дополнительных условий, и таким образом получается выражение для сложности исходного объекта относительно его описания. Оно и служит исходным материалом для построения количественных мер сложности и информации.

Отмеченные соображения оказываются полезными при построении мер сложности конкретных механизмов эволюции, формирующих реальный мир.

Они позволяют построить своеобразный мостик между математическими абстракциями и свойствами объектов реального мира. Это становится более понятным при сопоставлении свойств сложности, информации и энергии.

Связь между энергией и информацией была установлена довольно давно. Например, замечательным свойством информации является то, что для её получения обязательно необходимо затратить какое-то количество энергии. Оказывается, что минимальные затраты энергии, необходимые



для получения одного бита информации, вычисляются по формуле<sup>6</sup>:

$$kT \cdot \ln 2 \text{ эрг}, \quad (8)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/К° – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура системы, в которой происходит выработка информации. При 300 К°, то есть при нормальной температуре, эта величина равняется  $4 \cdot 10^{-14}$  эрг, или приблизительно  $10^{-2}$  электронвольт. Это очень малая величина. Например, минимальное количество энергии, необходимой для получения 100 терабайт информации (такое примерно количество содержится в 50 миллиардах страниц печатного текста), равно примерно 1 эрг. Нам пока что неизвестны реальные информационные процессы, работающие с такой колоссальной эффективностью!

Существуют в определенном смысле обратные процессы, а именно такие, где, образно говоря, уже информацию можно преобразовать в энергию. Идея о возможности таких процессов возникла в науке в связи с обсуждением парадокса с так называемым «демоном Максвелла», который представляет пример механизма, в некотором смысле преобразующего информацию в энергию, то есть использующего в качестве «горючего» информацию<sup>7</sup>. Информационно-энергетическая модель такого процесса описана в книге<sup>8</sup>. Данный эффект дает основания полагать, что аналогичные процессы происходят и в социотехнических системах; они подробно описаны в работах<sup>9, 10</sup>.

Таким образом, информационные процессы не составляют замкнутой системы и очень быстро

выводят в другую область свойств объектов – энергетическую. Это побуждает специалистов, занимающихся информационными свойствами систем, постепенно осознавать недостаточность одного лишь информационного подхода даже в собственной области. И – по мере всё более глубокого проникновения в свойства вещей – представления, факты и методы различных наук, по нашему убеждению, будут стремиться к конвергенции всё интенсивнее. В этом проявляется смысл трансдисциплинарности – основной определяющей черты современного развития науки.

Отметим, что далеко не любая информация может быть преобразована в полезный ресурс. В частном случае этот процесс, образно выражаясь, способен реализовать даже один информационный демон Максвелла. В реальных же ситуациях для этой цели создаются целые комплексы организаций и институций (следуя Селфриджу<sup>11</sup>, употребим для них название «пандемониумы»), обеспечивающие производство, многократные преобразования информации и ее транзакции до тех пор, пока она не поступит в социотехническую систему в нужный момент, да еще и в нужной форме, адаптированной к восприятию системой-реципиентом.

Из изложенного вполне однозначно следует, что сложность является не просто оценочной характеристикой, а фундаментальным объективным свойством явлений и процессов. По нашему мнению, существует глубокая аналогия между определениями понятия сложности, с одной стороны, и энергии, также являющейся некоей универсальной объективной характеристикой вещей, с другой. Оба отмеченных понятия – и сложность и энергия – являются исключительно многоаспектными и по-разному проявляются в различных ситуациях. Отмеченную выше аналогию можно проследить, обратившись к табл. 3.

<sup>6</sup> Волькенштейн М.В. Теория информации и эволюция. // «Кибернетика живого: биология и информация». – М.: Наука, 1984. – с. 45-53. Волькенштейн М. В. Энтропия и информация. – М.: Наука, 1986. – 190 с.

<sup>7</sup> Szilard L., Zs. Fur Physic, 54, 840, 1929.

<sup>8</sup> Стратонович Р.Л. Теория информации. – М.: Сов. радио, 1975. – 423 с., гл 12.

<sup>9</sup> Широков В.А. Інформаційно-енергетичні трансформації та інформаційне суспільство. //Українсько-польський науково-практичний журнал «НАУКА, ІННОВАЦІЯ, ІНФОРМАЦІЯ». – Київ, 1996. – № 1. – С. 48-66.

<sup>10</sup> В.А.Широков. Інформаційна теорія лексикографічних систем, – К.: Довіра, 1998. – 331 с.

<sup>11</sup> Selfridge O.G. Pandemonium: a paradigm for learning. In: Mechanisation of thought processes. London. HMSO., 1959. – P. 511–531.

Таблица 3

Сопоставление свойств энергии и сложности

ЭНЕРГИЯ – мера интенсивности процессов и объектов	СЛОЖНОСТЬ – мера неоднородности (структурированности, нечеткости, нерегулярности) процессов и объектов
<p><b>Формула размерности:</b> <math>ML^2t^{-2}</math></p> <p><b>Единицы измерения:</b> 1 Дж = 0.0002388458966275 Ккал = <math>1.60219 \cdot 10^{-19}</math> Эв</p> <p><b>Проявления (формы) энергии</b></p> <p><b>В механике:</b> кинетическая, потенциальная</p> <p><b>Энергия электромагнитного поля:</b></p> <p><b>В квантовой механике:</b> <math>\frac{E \cdot D}{2} + \frac{B \cdot H}{2}</math></p> <p><math>E_\psi = \langle \psi   H   \psi \rangle</math></p> <p>(энергия в состоянии <math>\psi</math> равна матричному элементу оператора гамильтониана, вычисленному по этому состоянию).</p> <p>Энергия и теплота, энергия и работа, энтальпия, внутренняя энергия, свободная энергия, энергия и масса, темная энергия...</p>	<p><b>Формула размерности:</b> <math>ML^2t^{-2}T^{-1}</math></p> <p><b>Единицы измерения:</b> Бит, Ккал·(К°)<sup>-1</sup>; К° – градусы Кельвина</p> <p><b>Проявления (формы) сложности</b> Информация, энтропия, вероятность, нечеткость ...</p>

Из анализа табл. 3 видно, что существует определенный параллелизм в определении свойств понятий энергии и сложности. В то же время подчеркнем, что данные понятия манифестируют совершенно различные свойства и характеристики объектов, что также следует из данной таблицы. Подчеркнем, что сложность, фактически, имеет статус физической величины, которую можно измерять, рассчитывать ее величину по соответствующим моделям и т. д. Ее фундаментальность, также как и фундаментальность понятия энергии, определяется многообразием ее проявлений и связей с другими фундаментальными величинами и понятиями. Еще одним выводом, который можно сделать из проведенного анализа, является то, что, по-видимому, описание фундаментальных систем должно осуществляться в духе принципа дополнительности Бора в виде двух связанных между собой комплементарных видов описаний – энергетического и сложностного.

### 3. Некоторые примеры действия Основного закона эволюции

Основной закон эволюции сформулирован нами в следующем виде:

**«СЛОЖНОСТЬ ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩЕЙ  
СИСТЕМЫ ВСЕГДА РАСТЕТ».**

При его формулировке подчёркивалось, что данное утверждение представляет собой лишь *необходимое условие* эволюции. Это уточнение весьма существенно. Отметим однако, что материальные факторы, формы, механизмы и способы реализации самой сложности весьма различаются для разных механизмов эволюции. Они обеспечиваются

разными, специфичными для каждого механизма субстанциями, отношениями, взаимодействиями и другими системными факторами. Это замечание справедливо даже и для различных фаз или этапов одного и того же механизма эволюции. Некоторая информация относительно данного замечания сведена в помещённую ниже табл. 4. В табл. 5 продемонстрированы и кратко прокомментированы 10 этапов Физического механизма эволюции в терминах соответствующих временных диапазонов, состояний, процессов и субстанций. При этом отмечается возрастание сложности соответствующего механизма эволюции на каждом этапе. Это служит еще одним подтверждением *Основного закона эволюции*.

Несмотря на то, что сложность является главным эволюционным фактором и двигателем, ее рост в пределах любого конкретно взятого механизма эволюции не может продолжаться неограниченно. Анализ данных свидетельствует о том, что каждый механизм эволюции (и, соответственно, этап отдельно взятого механизма) имеет свой, характерный именно для него предел роста сложности, обусловленный его системным устройством. Данное обстоятельство имеет исключительное значение для временной динамики механизма эволюции. Оно на самом деле служит главным фактором, определяющим ограниченность во времени каждого механизма (и этапа) эволюции, и одновременно обеспечивает дискретность самого множества механизмов.

Таким образом, оценка сложности эволюционирующих объектов, управляемых теми или иными механизмами, приобретает решающее значение для развития общей теории эволюции.

Эта задача весьма нетривиальна.

Таблица 4

Эволюционные механизмы, объекты и субстанции

МЕХАНИЗМ ЭВОЛЮЦИИ – ТИП СЛОЖНОСТИ	ОБЪЕКТЫ	СУБСТАНЦИИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ МЕХАНИЗМ ЭВОЛЮЦИИ
<b>ФИЗИЧЕСКИЙ</b>	Элементарные частицы, физические поля, ядра, атомы	Физические взаимодействия
<b>ХИМИЧЕСКИЙ</b>	Электроны, протоны, нейтроны, фотоны, атомы, молекулы	«Принцип Паули» (специфическое взаимодействие, определяющее порядок заполнения атомных орбит и регламентирующее состав таблицы Менделеева)
<b>ГЕНЕТИЧЕСКИЙ</b>	Все живые организмы	Геномы
<b>НЕЙРОННЫЙ</b>	Живые организмы, начиная с червей	Нервные системы
<b>КОММУНИКАЦИОННЫЙ</b>	Коллективные (социальные) животные, человек	Сигнальные системы
<b>А) ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЙ</b>	Некоторые социальные животные, человек	Сигнальные системы + Орудия труда
<b>Б) ПРОИЗВОДСТВЕННО-ОБМЕННЫЙ</b>	Человек	Коммуникационные системы, орудия и продукты труда
<b>В) ПРОИЗВОДСТВЕННО-ФИНАНСОВЫЙ-«+»</b>	Человек	Финансово-экономические, социальные, государственные, международные и глобальные институты. Техника, технологии, когнитивно-коммуникативные системы (в т. ч. сетевые).

Общих, универсальных методов, позволяющих оценить сложность того или иного реального объекта, насколько нам известно, не существует. Хотя теория сложности развивается уже больше полувека, ее содержательные результаты в основном сосредоточены в области так называемой вычислительной сложности и касаются артефактов. Сюда относится собственно проблематика сложности вычислений, а также близкие к ней задачи сложности алгоритмов, программ, сложности доказательств, сложности информационного поиска и т. п. Что касается моделей сложности реальных объектов и процессов, то результаты здесь гораздо скромнее. В основном они касаются поведения так называемых *сложных систем*, причем сложность последних оценивается всего лишь на качественном уровне через факторы многопараметричности и/или нелинейности.

Разумеется, количественных оценок сложности соответствующих систем не делается. Автору не известны даже постановки таких заданий.

Представляется весьма заманчивой возможность построения формальной модели сложности реальной системы путем сведения ее к некоей известной задаче определения вычислительной сложности. Однако и такие примеры нам, к сожалению, неизвестны. Поэтому наши попытки определения сложности и динамики тех или иных механизмов эволюции будут в значительной мере эвристичными, имеющими характер «правдоподобных рассуждений».

Итак, приступим к оценке сложности и ее динамики для некоторых механизмов эволюции. В качестве таковых мы здесь рассмотрим генетический, нейронный и коммуникационный.

Таблица 5

Этапы физической эволюции (физического механизма эволюции)

ЭТАП	НАЧАЛО (ВРЕМЯ: t)	ПЕРИОД	СОСТОЯНИЕ	ПРОЦЕССЫ	СУБСТАНЦИЯ
1 Big Bang	t = 0	Планковская эпоха 0 – 10 <sup>-43</sup> сек.	Полная симметрия материи. Минимальная сложность	Большой Взрыв. Планковская температура и плотность	Первичная материя
2	10 <sup>-43</sup> сек.	10 <sup>-43</sup> – 10 <sup>-35</sup> сек. Эпоха Великого Объединения	Первое спонтанное нарушение симметрии. Рост сложности	Выделение гравитационного взаимодействия	Первичная плазма
3	10 <sup>-35</sup> сек.	10 <sup>-35</sup> – 10 <sup>-31</sup> сек. Инфляционная эпоха	Второе спонтанное нарушение симметрии. Рост сложности	Отделение сильного от электрослабого взаимодействий	Кварк-глюонная плазма, Электрослабая материя
4	10 <sup>-31</sup> сек.	10 <sup>-31</sup> – 10 <sup>-12</sup> сек. Электрослабая эпоха	Образование W и Z бозонов и бозонов Хиггса	Образование масс элементарных частиц	Адроны и лептоны
5	10 <sup>-12</sup> сек.	10 <sup>-12</sup> – 10 <sup>-6</sup> сек.	Третье спонтанное нарушение симметрии. Рост сложности	Охлаждение кварк-глюонной плазмы. Образование адронов.	Материя и антиматерия.
6	10 <sup>-6</sup> сек.	10 <sup>-6</sup> – 100 сек.	Рост сложности	Образование нуклонов. Аннигиляция адронов. Освобождение нейтрино	Нуклоны Нейтрино Электромагнитное излучение
7	100 сек.	100 сек. – 3 мин.	Рост сложности	Нуклеосинтез	Образование первичного состава звездного вещества: 25% гелия-4, 1% дейтерия, следы более тяжелых элементов (до бора включительно), остальное водород
8	3 мин.	3 мин. – 380 тыс. лет.	Рост сложности	Нуклеосинтез. Вещество начинает доминировать над излучением. Рекомбинация водорода. Доминирование гравитации	Водород, гелий, дейтерий, следы лития-7
9	380 тыс. лет.	380 тыс. лет. – 550 млн. лет.	Рост сложности	Темные века	Вселенная заполнена водородом, гелием, реликтовым излучением водорода на волне 21 см. Звезды и квазары отсутствуют
10	550 млн. лет.	(550–800) млн. лет.	Рост сложности	Реионизация. Первые звезды, галактики, скопления и сверхскопления галактик	Атомы, вещество, реликтовое излучение, космическая пыль, звезды, галактики



Как отмечалось, субстанцию генетического механизма образуют геномы. Генетическая история и теория изучены достаточно подробно и им посвящены сотни фундаментальных монографических трудов. Поэтому мы не будем здесь пересказывать основы генетики, а перейдем сразу к формулировке наших предложений.

Мы полагаем, что **параметром (количественным коррелятом) сложности генетического механизма эволюции служит объем генетической информации, точнее, размер генома.** Биологи традиционно измеряют размер геномов количеством нуклеотидных пар (длиной генетического кода). Для наших целей иногда будет удобнее измерять длину кода ДНК в битах. Поскольку для кодирования генов используется 4 нуклеотидных остатка, то для получения объема генетического кода в битах, нужно просто умножить «традиционную» длину кода на два. Мы осознаем, что это довольно грубая оценка, потому что детали генетических процессов гораздо более изощренны и требуют для своего достаточно полного описания гораздо более тонких параметров, чем просто длина генетического кода. Однако, действуя в рамках *Презумпции нулевого приближения*, мы убеждаемся, что получаем результаты, вполне согласованные с действительностью. А все мыслимые их уточнения, по нашему мнению, лишь усиливают изначально грубую картину происходящего. Соответствующие данные об исторической динамике сложности генетического механизма эволюции приведены в табл. 7.

Субстанцией **нейронного механизма эволюции** мы полагаем нервные (нейронные) системы. В качестве **параметра сложности предлагаем определить объем нейронной системы с учетом ее известной избыточности.** Разумеется, и здесь необходимо учитывать, что нервная система является результатом долгой и отнюдь нелинейной эволюции. Различные типы нервных систем развивались параллельно, признаки наследовались избирательно<sup>12</sup>. Для полной и точной количественной оценки сложности нейронного механизма эволюции необходимо проведение специального исследования, учитывающего хотя бы эффекты, отраженные в приведенной ссылке. Здесь мы воспользуемся всего лишь одним параметром — динамикой числа нейронов, который дает нам в нулевом приближении оценку

<sup>12</sup> Для общего представления об исторической эволюции нервной системы можно получить сведения из учебника Г.Шеперда: Шеперд Г. Нейробиология. — Учебник в 2-х томах. Как отмечается в другом учебнике («Общий курс физиологии человека и животных» (под редакцией профессора А. Д. Ноздрачева, книга первая. М., «Высшая школа», 1991.) «Предполагают, что исходной формой нервной системы всех животных была диффузная. Из этой формы в ходе эволюции вторичноротых сформировалась «спинная» трубчатая нервная система — спинной и головной мозг, а в ходе эволюции первичноротых, например, насекомых, — узловая — брюшная нервная цепочка с окологлоточными ганглиями (головным мозгом этих животных). Основными направлениями эволюционного развития всех нервных систем, видимо, были централизация элементов, цефализация (развитие головного мозга, головных ганглиев) и общее увеличение числа нейронов и их синаптических связей».

сложности нейронного механизма эволюции в историческом плане. Соответствующие данные об исторической динамике сложности нейронного механизма эволюции также приведены в табл. 6.

Особый интерес **представляет коммуникационный механизм эволюции.** Ведь коммуникация является принципиально иным, чем предыдущие, а именно, небиологическим (точнее, *биосоциальным*) механизмом усложнения. Здесь под коммуникацией мы понимаем специфическую область социального взаимодействия биологических субъектов, а именно, дву- (и много-) стороннее общение индивидуумов, в основе которого лежит передача социально значимых сигналов. При этом вид, форма, содержание и когнитивный статус используемых символов может варьироваться в очень широких пределах. Коммуникация предполагает наличие психики в качестве структурно-функционального субстрата, поддерживающего коммуникативные процессы. В свою очередь, психика возникает из свойства раздражимости живых существ и развивается в связи с образованием и развитием у них нервной системы, что обеспечивает связь с предыдущим нейронным механизмом эволюции.

В своем развитии психика прошла ряд последовательных и надстраиваемых одна над другой стадий, среди которых отметим: перцептивную, сенсорную, интеллектуальную и др. Мы начинаем отсчет коммуникационного механизма с зарождения интеллектуальной стадии — примитивных форм мышления на основе зарождения элементов второй сигнальной системы. Такими способностями обладают социальные биологические субъекты, начиная с некоторых социальных насекомых (пчелы, муравьи и т. п.). В книге<sup>10</sup> выделяется два типа интеллекта (1-го и 2-го рода), дифференцированные объемом и качеством связей между мыслительной и языковой подсистемами мыслеречевых аппаратов субъектов-участников коммуникативных процессов. В этой же книге (с. 37) сформулирован основной когнитивный тракт (ОКТ), концентрирующий этапы когнитивно-коммуникативного освоения действительности:

ВОСПРИЯТИЕ → ОЩУЩЕНИЕ →  
 ПЕРЕЖИВАНИЕ → ПОНИМАНИЕ →  
 → ОСОЗНАНИЕ → РЕФЛЕКСИЯ → РЕАКЦИЯ.

ОКТ складывался исторически в процессе разворачивания коммуникационного механизма эволюции.

В соответствии с изложенным мы считаем, что **субстанциями коммуникационного механизма эволюции являются сигнальные системы,** развившиеся у некоторых видов социальных животных и, разумеется, у людей. Причем «языковая» («речевая») коммуникация служит здесь главным элементом коммуникационного механизма усложнения.

Возникает вопрос: как выбрать меру сложности коммуникационного механизма? Мы предлагаем определить в качестве этой меры **объем**



«лексической системы» — количество «слов» в «языках» соответствующих коммуникативных сообществ.

Данное предложение нуждается в пояснении. Ведь понятие языка (и лексики) животных, а тем более — насекомых весьма условно. Оно значительно отличается, от того смысла, который мы вкладываем в определение человеческого языка.

С другой стороны, дать строгое определение даже человеческого языка также не представляется возможным. Тем не менее, мы знаем, что все коммуникативные («языковые») системы обладают рядом весьма фундаментальных общих свойств, позволяющих отнести их к некоторому единому классу. Так, во всех таких системах выделяются некие дискретные единицы — носители (концентраторы) семантической, социально значимой для сообщества коммуникантов информации. Они обладают дихотомической природой и являются носителями отношения «форма-содержание». Такие коммуникативные системы обладают целым рядом свойств, близких к тем, которые были описаны нами в ходе изложения колмогоровского определения информации. Еще ближе они (вплоть до буквального совпадения) к свойствам так называемых *элементарных информационных единиц*, развившихся в результате тех или иных *лексикографических эффектов*<sup>13</sup>. Эти соображения позволяют нам использовать объем лексики коммуникативных систем соответствующих сообществ в качестве меры сложности коммуникационного механизма

<sup>13</sup> Понятия *лексикографического эффекта в информационных системах* и *элементарных информационных единиц* были введены и исследованы нами в книге: В. А. Широков. Информационная теория лексикографических систем. — К.: «Довіра», 1998, 330 с.

эволюции в его динамике. Соответствующие данные сведены нами в табл. 6.

Общие данные по сравнительной динамике генетического, нейронного и коммуникационного механизмов приведены в табл. 7.

#### Важные (промежуточные) выводы первой части

1. Мы рассмотрели три механизма эволюции: генетический, нейронный и коммуникационный.

2. Субстанциями этих механизмов являются, соответственно, геномы, нервные и сигнальные системы.

3. Очевидно, что эволюция началась не с них. Перед тем была химическая эволюция и физическая эволюция (может и не одна!). И еще некоторые.

4. Все отмеченные механизмы имеют одну общую черту: **разворачивание любого механизма эволюции приводит к усложнению эволюционирующей системы. Это означает, что в процессе временной динамики конкретного механизма эволюции его сложность (оцениваемая величиной соответствующего количественного коррелята) возрастает, что показано в табл. 7.**

5. При этом каждый эволюционный механизм — механизм эволюции через усложнение системы — **имеет свой естественный предел.** Он «запрограммирован» на достижение некоего, характерного именно для данного механизма максимума сложности.

6. Если эволюционирующая система подходит к этому пределу (**ее ресурсы усложнения приближаются к исчерпанию**), она попадает в так называемую «ловушку сложности», вступает в критическую фазу и пытается «найти» другие механизмы, способные

Таблица 6

Динамика сложности коммуникационного механизма эволюции

КОММУНИКАТИВНОЕ СООБЩЕСТВО	КОЛИЧЕСТВО «СЛОВ» (ЗНАКОВ)	ОТНОСИТЕЛЬНАЯ МЕРА СЛОЖНОСТИ
НАСЕКОМЫЕ (ПЧЕЛЫ, МУРАВЬИ)	~ 100	1
ОБЕЗЬЯНЫ, ДЕЛЬФИНЫ	~ 10000	100
ЧЕЛОВЕК	~ 10 000 000 (слова + словосочетания-термины); число семантических состояний ~200 000 000	100 000 2 000 000

Таблица 7

Сравнительная динамика роста сложности генетического, нейронного и коммуникационного механизмов

ОБЪЕКТЫ ЭВОЛЮЦИОННОЙ СИСТЕМЫ	МЕХАНИЗМЫ ЭВОЛЮЦИИ (МЕХАНИЗМЫ РОСТА СЛОЖНОСТИ)		
	Генетический	Нейронный	Коммуникационный
	ПАРАМЕТРЫ СЛОЖНОСТИ		
	Объем геномов (в битах)	Нормализованный объем нейронной системы (в битах)	Объем знаковой («лексической») системы (единиц)
Вирус	$10^3 - 10^4$	0	0
Бактерия	$10^5$	0	0
Амеба	$10^6$	0	0
Черви	$10^6$	$10^0 - 10^1$	0
Пчелы, муравьи	$10^7$	$10^3 - 10^4$	100
Шимпанзе, дельфины	$10^8$	$10^7 - 10^8$	10000
Человек	$10^9$	$10^9$	От $10^7$ до $2 \cdot 10^8$ и больше

обеспечить ее усложнение, и следовательно – продолжить процесс эволюции.

7. В рассматриваемом случае к **генетическому механизму** (когда он приблизился к своему пределу) на определенном этапе был подключен другой – **нейронный механизм** и эволюция была продолжена. Затем **нейронный механизм** приблизился к своему исчерпанию и подключился **коммуникационный механизм**.

Резюмируем изложенное. Насколько мы можем судить из анализа имеющихся данных, временная динамика всех механизмов эволюции имеет общие черты. Схематически они изображены на рис. 1.

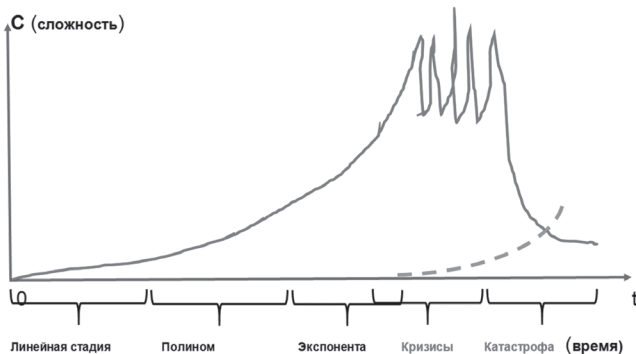


Рис. 1. Обобщенная динамика механизма эволюции

На начальной стадии развертывания механизма эволюции сложность растет линейно по времени. Эта эпоха относительно спокойного, прогнозируемого развития эволюционирующей системы, ее «золотой век». В этот период происходит становление основных системных характеристик и детерминантов системы и выход их на стадию доминирования.

Затем наступает эпоха полиномиального роста сложности. Система разворачивает свои характерные свойства. Развитие при этом ускоряется, раскрывая все потенциальные возможности соответствующего механизма эволюции.

После этого система вступает в фазу экспоненциального роста сложности. Характерной особенностью экспоненциального периода является то, что он происходит на границе предельных возможностей развития системы. Данный период усложнения плохо поддается или уже совсем не поддается управлению и в системе начинают нарастать критические явления. Их причиной является внутренняя противоречивость эволюционного процесса: *Основной закон эволюции* требует возрастания сложности, а необходимость обеспечения управляемости системы с такой же необходимостью ограничивает этот рост. Критические явления нарастают и могут стать для системы катастрофическими. В это время в недрах системы (а, возможно, и вне их) происходит (если происходит) зарождение нового механизма эволюции, с которым осуществляется примерно такая же история.

Одним словом: история продолжается!

Во второй части работы мы расскажем о том, какой она видится применительно к человеческому сообществу.

## RESUME

Volodymyr Shyrokov

### EVOLUTION AS UNIVERSAL NATURAL LAW (PROLEGOMENA TO THE FUTURE GENERAL EVOLUTION THEORY)

The work formulates the principles of the general theory of evolution and its applications. The characteristic feature of the work is that the object of research is the entire Universe - "without exceptions and seizures." Such a general formulation of the problem dictates the need to develop a special research methodology.

In the first part of the paper the author's general conception of evolution is presented. The basic concept of the general theory of evolution, i.d. the concept of the evolution mechanism, is introduced and justified. According to the author's concept, the evolution of the world is not continuous, but realized in some discrete forms, which are "mechanisms of evolution". Each mechanism of evolution is characterized by the complex of materially expressed agents specific to this mechanism, which allows one to individualize and distinguish it among other mechanisms. However, all mechanisms have some common properties, which allows them to be typified and attributed to a single class of phenomena, namely, to the class "evolution".

The following evolutionary mechanisms have been singled out and considered with varying degrees of detail: physical, chemical, genetic, neural, communication, and production. Each of these mechanisms has its own "fine structure". For example, 10 phases are allocated for the physical mechanism. The production mechanism consists of the following stages: 1. Consumer; 2. Exchange; 3. Financial; 4. Financial and information; 5. Financial and information-network. In detail they are analyzed in the second part of the work.

The mechanisms noted do not exhaust the set of all the mechanisms of evolution, which, generally speaking, is assumed to be open. And the possibility of parallel development of several mechanisms is not ruled out.

The paper analyzes the internal causes underlying all evolutionary processes. It is suggested that the cause and engine of evolutionary processes is the complexity of the evolving system. This means that increasing the complexity of the system is a necessary condition for its evolution: if the system evolves, its complexity increases. Thus, the author comes to the formulation of the Basic Law of Evolution: the complexity of the evolving system grows constantly.

In order to ensure the meaningful application of complexity theory, the author details this theory, starting with its intuitive interpretation by the example of so-called constructive objects in the form of linear chains of symbols from some finite alphabet. The basic formulation and author's interpretation of A. Kolmogorov's algorithmic complexity theory is given. The multi-aspect of the concept of complexity is underlined and a certain parallelism is established in the definition of the concepts of complexity on the one hand and energy on the other.

The importance of constructing measures of complexity for evolving objects controlled by one or another mechanism is emphasized. A phenomenological approach is being developed to assess the complexity of various evolutionary mechanisms. Thus, measures are proposed to assess the complexity of the genetic, neural and communication mechanisms, which is an illustration of the Basic Law of Evolution proposed by the author.

The effect of this law is illustrated by examples of physical, genetic, neural and communication mechanisms. The character of the general temporal dynamics of an arbitrary evolutionary mechanism is established. It is concluded that any evolutionary mechanism has its own natural limit of complexity growth, due to its systemic arrangement.

УДК 004.853

Л.Э. Чалая<sup>1</sup>, С.Г. Удовенко<sup>2</sup>, С.А. Гринев<sup>3</sup><sup>1</sup> ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, larysa.chala@nure.ua;<sup>2</sup> ХНЭУ, г. Харьков, Украина, serhii.udovenko@nure.ua;<sup>3</sup> ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, sgrinyov@gmail.com

## МЕТОД НЕЙРОСЕТЕВОЙ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК В РЕДАКТИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕКСТАХ

Предложен метод анализа электронных текстов, предназначенный для обнаружения орфографических и морфологических ошибок. Метод основан на применении кодера и декодера, реализуемых с помощью рекуррентной нейронной сети, обучаемой на основе корпуса параллельных англоязычных текстов, который содержит искаженные и скорректированные предложения. Результаты тестирования подтверждают эффективность применения метода для выявления ошибок в политематических текстовых документах.

ОБРАБОТКА ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕКСТОВ, МАШИННЫЙ ПЕРЕВОД, КОРРЕКЦИЯ ГРАММАТИЧЕСКИХ ОШИБОК, КОДЕР-ДЕКОДЕР, РЕКУРРЕНТНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ

### Введение

В последние годы в области обработки текстов на естественном языке получили развитие исследования, связанные с мониторингом социальных сетей и обработкой преднамеренно искаженных текстов. Разработаны различные методы решения задач информационного поиска, машинного перевода и т.п. [1]. При этом базовые принципы обработки, как правило, связываются с компьютерной лингвистикой, однако многие новые задачи (например, выделение ключевых слов в документах или мониторинг социальных сетей), язык которых может очень сильно отличаться от «канонического», решаются и без ее применения. К задачам, требующим применения новых методов обработки текстов, можно отнести извлечение мнений, определение эмоциональной окраски текстов, анализ реального влияния источников информации, обработку некорректных или преднамеренно искаженных текстов [2].

Важной задачей автоматического анализа электронных текстов является коррекция грамматических и морфологических ошибок (GEC) [3]. Современные поисковые системы и текстовые редакторы (Google, Word, META) частично решают эту задачу. Они содержат орфографические корректоры, которые сохраняют все формы слов и статистику ошибок. Орфокорректоры подобного типа хорошо работают в облачных вычислениях, но показывают невысокую скорость на персональных компьютерах с ограниченными вычислительными ресурсами. Здесь корректоры, предназначенные для проверки правописания, как правило, хорошо работают лишь при наличии одиночных ошибок в словах, содержащихся в словаре. Проверка текста в системах анализа и коррекции ошибок в текстах может вестись в режиме «off-line», когда формируется протокол замечаний по тексту, либо в режиме «on-line», когда исправление ошибок ведется по мере их обнаружения (как правило, после получения соответствующего подтверждения от

пользователя). При обнаружении ошибки система может предложить вариант ее исправления, а при наличии нескольких вариантов — их упорядоченный список. Замечания по тексту также могут носить различный характер. Они могут быть локальными (указывается фрагмент текста с ошибкой) и глобальными (выдается диагностическое сообщение, касающееся всего текста).

Следует отметить, что в настоящее время не существует универсальных систем редактирования черновых электронных документов. Эффективность применения существующих методов коррекции ошибок в системах электронных текстов на естественном языке зависит от характера конкретных задач, решаемых в процессе такой обработки. При этом имеют большое значение язык и тематическая направленность текста, а также тип исправляемых ошибок, формат представления текста, трудоемкость алгоритма коррекции и требования к качеству коррекции.

Одной из важных практических задач, связанных с необходимостью коррекции ошибок и опечаток в черновых электронных текстах, является задача анализа документов на иностранных языках, составленных пользователями, не являющимися носителями этих языков. Как правило, такие документы содержат большое количество грамматических и морфологических ошибок и нуждаются в редактировании. Для решения задач автоматического редактирования таких документов перспективным является применение машинного обучения и специализированных нейросетевых моделей [4, 5]. В последнее время были разработаны нейронные модели коррекции языка (NLC), показывающие обнадеживающие результаты [6]. Такие модели могут быть эффективно использованы в задачах GEC, поскольку они позволяют исправлять ошибочные фразы и отдельные грамматические ошибки, которые не были замечены в подготовительном наборе. Путем внедрения NLC в системы GEC достигается значительное повышение



качества исправления грамматических ошибок в исходных электронных текстах на этапе их предварительного редактирования.

**Целью** настоящей работы является исследование эффективности использования нейронных сетей в системах коррекции электронных англоязычных текстов с целью исправления грамматических и морфологических ошибок и разработка модифицированного метода с использованием нейросети многослойного перцептрона.

Достижение этой цели обусловило необходимость решения следующих задач: анализ эффективности различных подходов к проблеме коррекции электронных текстов; имитационное моделирование различных архитектур нейронных моделей редактирования электронных текстов; разработка и тестирование модифицированного метода коррекции ошибок в электронных англоязычных текстах.

### 1. Анализ задачи автоматической коррекции ошибок в редактируемых электронных текстах

В последнее время повысился интерес к решению практических задач коррекции ошибок различных типов в черновых англоязычных электронных текстах.

В частности, это связано с существенным ростом числа людей, изучающих английский как второй язык (English as a Second Language-ESL) во всем мире.

Рассмотрим существующие ГЕС-подходы к обработке редактируемых англоязычных документов, которые могут быть полезны при разработке рекомендаций и учебных пособий для пользователей ESL-систем.

Эти подходы позволяют создать программы проверки англоязычных текстов, подготовленных на естественном языке (ЕА) и предположительно содержащих значительное количество грамматических и морфологических ошибок. Такие программы либо исправляют входной текст автоматически, либо формируют некоторый протокол замечаний. Любой ЕЯ представляет собой сложную систему с множеством правил и внутренних связей. Точность и правильность работы программ ГЕС определяется глубиной анализа редактируемых текстов. Достаточно глубокий анализ может быть достигнут только для определенных узких предметных областей (вследствие специфичности подязыков таких областей, связанной с наличием в каждой области своих терминов и семантических отношений).

Для создания универсальных ГЕС-систем, работающих с ЕЯ без потери глубины анализа, в настоящее время не хватает либо технических возможностей (быстродействия, памяти), либо теоретической базы (например, схемы достаточно полного, глубокого и непротиворечивого описания семантики ЕЯ). Однако в ГЕС-системах, предназначенных для ESL-пользователей и разных предметных областей, может быть принята концепция

поверхностного анализа редактируемых текстов (ПАРТ), осуществляемого в реальном масштабе времени (например, в процессе электронной переписки ESL-пользователей). Дальнейшее усложнение функциональных возможностей и повышение качества ГЕС-систем в практических областях возможно с помощью применения в таких системах более сложных (с точки зрения учета особенностей ЕЯ) лингвистических моделей. Методы обнаружения и коррекции орфографических и морфологических ошибок в электронных текстах широкой тематики базируются на представлении о тексте как о цепочке независимо появляющихся словоформ.

Большая часть методов ПАРТ, которые используются во время редакторской ГЕС-обработки текстовой информации, сводится к задаче поиска по сходству соответствующего эталонного слова.

Наиболее распространенными методами словарного поиска по сходству являются: последовательное сканирование словаря; расширение выборки; применение n-грамм; хеширование; триангуляционные деревья; trie-деревья (лучи) и т.д. [7].

При поиске по сходству с использованием полного перебора всех терминов словаря, или последовательного сканирования, необходимо каждое слово из словаря сравнить с образцом. В большом словаре многократное повторение даже простого сравнения требует значительных затрат времени. При этом основной проблемой является значительная вычислительная сложность, что делает неэффективным его использование для поиска на больших массивах данных. Идея метода расширения выборки заключается в том, чтобы свести задачу к поиску точного равенства путем построения наиболее вероятных «ложных» вариантов поискового шаблона и поиска всех таких «ошибочных» вариантов в словаре. При этом шаблон содержит слова, для которых расстояние редактирования мало, а при допущении двух и более ошибок расширенная выборка становится слишком большой. Кроме обычных ошибок, этот метод может учитывать изменение формы (окончание, суффикс) слова. Метод расширения выборки широко используется программами проверки орфографии при ПАРТ-анализе.

Для точного поиска слов по сходству традиционно используются деревья и хэш-таблицы [7]. Идея, которая лежит в основе хэш-таблиц, заключается в том, что множество слов можно отобразить на ограниченном множестве целых чисел  $X$ :  $x \in X, 1 \leq x \leq n$ . Хэш-таблица является массивом размерности  $n$ . Чтобы сохранить слово  $S$ , надо вычислить хэш-функцию  $i = h(S)$  и присвоить  $i$ -му элементу массива значение  $S$ .

ПАРТ-методы, основанные на построении различных вариантов деревьев, считаются достаточно быстрыми. Существуют различные типы деревьев: деревья, строящиеся на множестве элементов,



которые можно сравнивать (обычные бинарные деревья, b-деревья, b+-деревья и т.д.); деревья, строящиеся на множестве элементов, которые можно представить в виде последовательности (trie-деревья); деревья, в которых задана метрика на множестве элементов (триангуляционные деревья); частотные деревья и kd-деревья, которые за счет особой структуры данных позволяют уменьшить количество сравнений.

Наиболее популярными деревьями, которые используются для поиска слов по сходству, являются триангуляционные и trie-деревья. Trie-деревья, в отличие от обычных сбалансированных деревьев, имеют общее начало для всех слов, расположенных в одном поддереве. Каждое ребро дерева помечено некоторой строкой. Терминальным вершинам («листьям») соответствуют строки списка. Обычно trie-деревья используются для поиска по подстроке, но их можно эффективно использовать и для поиска по сходству. Чтобы обеспечить поиск по подстроке, необходимо хранить в trie-дереве все суффиксы (или префиксы терминов). Триангуляционные деревья позволяют индексировать множество произвольных структур, при условии, что на них задана метрика.

Для уменьшения множества данных, подлежащих ПАРТ-обработке, применяется предварительная фильтрация. Она проста в реализации и с помощью быстрых и неточных функций сравнения позволяет существенно уменьшить выборку вероятно-релевантных записей. К методам предварительной фильтрации можно отнести методы снижения размерности данных, или методы, которые реализуют быстрые и приблизительные оценки известных строчных метрик. Наиболее применяемым методом предварительной фильтрации текстов при ПАРТ-обработке является использование  $n$ -грамм, в соответствии с которым для описания слова строится набор подстрок размера  $n$ , который может быть или фиксированным для всех подстрок, или оптимизироваться для каждой подстроки отдельно. Например, слово  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$  будет описывать набор  $n$ -грамм  $\{s_1 s_2 \dots s_n, s_2 s_3 \dots s_{n+1}, \dots, s_{n-m+1} \dots s_{m-1} s_m\}$ .

При использовании  $n$ -граммного индекса словарь содержит все  $n$ -граммы, построенные из всех слов словаря. Каждый инвертированный список ставит в соответствие  $n$ -грамме все слова словаря, которые содержат данную  $n$ -грамму. Если необходимо найти слова, содержащие  $n$ -граммы образца, поиск проводится по всем  $n$ -граммам словаря, которые с ними совпадают. При поиске может учитываться позиция  $n$ -грамм в слове, если это было учтено при построении индекса. Результаты проведения поиска на каждой  $n$ -грамме оцениваются с помощью коэффициента оценки пересечения множеств. Если такой коэффициент больше заданного порогового значения, то слово словаря считается значимым и добавляется к результатам. Далее полученное множество может обрабатываться

более точным методом поиска сходства для получения окончательного результата. К недостаткам всех рассмотренных методов поиска по сходству можно отнести сложность построения их хорошо сбалансированных параллельных аналогов.

Существуют также и другие подходы к обнаружению и исправлению грамматических ошибок в англоязычных текстах. Некоторые из них основаны на классификации по набору классифицирующих модулей, каждый из которых адресован конкретному типу ошибки, и статистическом машинном переводе (SMT), решающем задачу перевода с «плохого» на «хороший» английский язык. Гибридные модификации этих подходов сочетают в себе процедуры классификации и SMT, а также частично используют компоненты, основанные на правилах [8]. Каждый подход имеет свои особенности. Поскольку классификационный подход способен сосредоточиться на каждом отдельном типе ошибки, используя отдельный классификатор, то он лучше работает на типах ошибок, для которых можно построить специализированные классификаторы (например, для ошибок типа связка «субъект-глагол»). Таким образом, недостаток классификационного подхода заключается в том, что один классификатор должен быть построен для каждого типа ошибок, поэтому комплексная система ГЕС нуждается в построении множества классификаторов, что усложняет ее конструкцию. Кроме того, классификационный подход не адресует несколько типам ошибок, которые могут взаимодействовать.

Применение SMT подхода позволяет естественным образом учитывать взаимодействия между словами в предложении и находить наилучшее скорректированное предложение. Методы ПАРТ-обработки, основанные на SMT, дают возможность осуществлять преобразование текста с ошибками в исправленный текст без явного моделирования типов ошибок.

Недостатком этого подхода является необходимость наличия на этапе обучения большого параллельного обучающего корпуса, состоящего из текстов, созданных ESL-пользователями, и соответствующих исправленных текстов.

Общая структура коррекции ошибок при ПАРТ-обработке англоязычных электронных текстов во многом зависит от учитываемых типов ошибок. К таким ошибкам следует отнести:

- орфографические ошибки (пропуск одной буквы, замена одной буквы, перестановка двух рядом стоящих букв, одна лишняя буква);
- морфологические ошибки (ошибки в окончаниях, употребление отсутствующих в языке форм слов, несоблюдение правил их чередования в предложении, употребление незнакомых вариантов слов, редких и жаргонных терминов);
- синтаксические ошибки (пунктуационные ошибки, нарушение нормативного порядка слов, некорректное использование пробелов);

– лексико-семантические ошибки (употребление слов в ненормативном значении, нарушение лексической сочетаемости, семантические противоречия).

При формировании электронных текстов ESL-пользователями могут возникать ошибки всех рассмотренных типов. Примеры типичных ошибок, содержащихся в исходных текстах, подлежащих ГЕС – коррекции, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Примеры типичных ошибок и применения редких слов в ESL-текстах**

Фрагмент текста	Комментарий к ошибке
visitted	visited (удвоение)
basicly	basically (пропуск)
all for not	all for <b>naught</b> (значение фразы)
ahtlete	athlete (перестановка)
came	come (замена)
17.06.12	Редкое слово
;)	Смайлик (редкое слово)
on the same token	<b>by</b> the same token (неправильное употребление глагола)
The woman <b>which</b>	The woman <b>who</b> (неправильное наречие)

**2. Нейросетевые модели представления и коррекции электронных текстов**

Рассмотрим некоторые варианты применения искусственных нейросетей в задачах исправления ошибочных фраз и отдельных грамматических ошибок при обработке англоязычных электронных текстов. Нейросетевые модели позволяют использовать распределенные векторные представления слов (distributed vector space word representations). В [4] и [5] были предложены две нейросетевых языковых модели с таким представлением слов – Continuous Bag-of-Words и Skip-gram. Основным преимуществом этих моделей являются существенно меньшие вычислительные затраты на обучение по сравнению с другими известными нейросетевыми языковыми моделями. Это достигается отчасти благодаря использованию иерархического программного обеспечения, основанного на представлении слов словаря в виде дерева Хаффмана.

Данные модели реализуются при помощи двухслойной либо трехслойной нейронной сети. Распределенные векторные представления слов заключены в синаптических весах первого слоя сети. Рассмотрим архитектуру сети для модели Continuous Bag-of-Words.

В этой модели слово  $w_t$  предсказывается нейронной сетью по его контексту  $w_{t-k}, \dots, w_{t-1}, w_{t+1}, \dots, w_{t+k}$ . Особенностью этой модели является динамический размер окна: число  $I$  принимает равновероятные значения от 1 до некоторого  $N$ . Обучение заключается в максимизации целевой функции

следующего вида:

$$L = \sum_{t,k} \log P(w_t | w_{t-k}, \dots, w_{t-1}, w_{t+1}, \dots, w_{t+k}). \quad (1)$$

Второй (скрытый) слой сети трехслойной нейронной сети, соответствующей этой модели, предназначен для усреднения распределенных векторов, соответствующих словам контекста. Число нейронов в нем равно размерности  $D$  распределенных векторов.

Каждой нелистой вершине дерева Хаффмана, построенного по словарю  $V$ , соответствует один нейрон третьего слоя с  $D$  синаптическими весами. Пусть  $X$  – множество нейронов третьего слоя сети, соответствующих всем нелистовым вершинам дерева Хаффмана на пути от корню к слову  $w_t$ . Каждый нейрон из  $X$  осуществляет скалярное умножение вектора своих синаптических весов на вектор выходных сигналов второго слоя (т.е. среднее по векторам контекста), а к результату применяет логистическую функцию. Совокупность выходных сигналов  $w_i^*$  нейронов  $X$  (их количество равно длине кода Хаффмана слова  $w_t$ ) сравнивается с кодом Хаффмана слова  $w_t$ . Целью обучения является минимизация функции следующего вида:

$$P(w_t | w_{t-k}, \dots, w_{t-1}, w_{t+1}, \dots, w_{t+k}) = \prod_i |w_{t_i} - w_i^*|, \quad (2)$$

где  $w_{t_i} \in \{0,1\}$  – цифра в разряде  $i$  кода Хаффмана для слова  $w_t$ .

После вычисления  $w_i^*$  производится коррекция распределенных векторов слов контекста (синаптических весов определенной области нейронов первого слоя), а также синаптических весов нейронов для  $X$  в направлении возрастания данной условной вероятности.

Основное отличие двухслойной модели Skip-gram от модели Continuous Bag-of-Words заключается в том, что слово  $w_t$  предсказывается столько раз, сколько слов в его контексте (на основе только одного из слов контекста).

Можно показать, что вычислительная сложность обучения для модели Continuous Bag-of-Words составляет  $Q_1 = O(N \times D + D \times \log_2 |V|)$ , а для модели Skip-gram –  $Q_2 = O(N \times D + N \times D \times \log_2 |V|)$ .

Нейросетевые модели коррекции ошибок при ПАРТ-обработке исходных англоязычных текстов могут быть представлены в рекуррентных вариантах, что дает дополнительные преимущества при реализации вычислительных ГЕС - процедур.

**3. Модифицированный метод нейросетевой коррекции ошибок в электронных текстах**

Предлагаемый метод коррекции ошибок на базе естественного языка основан на применении кодера и декодера, реализуемых с помощью рекуррентной нейронной сети (RNN), обучаемой на основе корпуса параллельных текстов, который содержит искаженные и скорректированные предложения. Пример работы такого метода приведен на рис. 1.

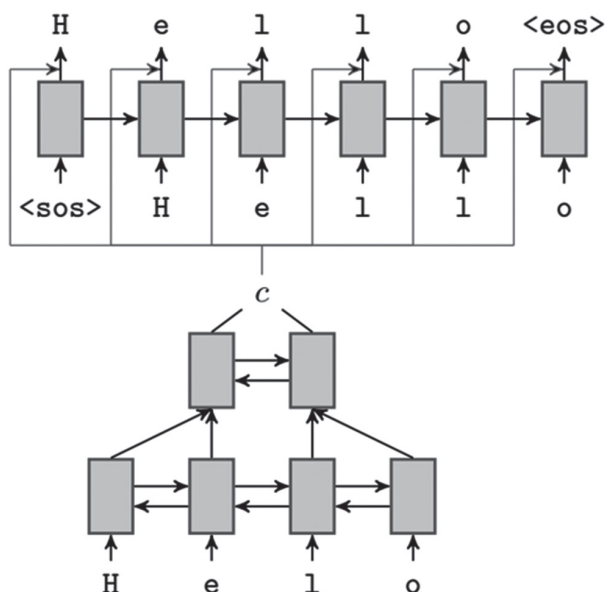


Рис. 1. Пример применения кодера и декодера RNN-модели

Искаженное входное предложение (на рис.1 – «Helo») обрабатывается системой коррекции, после чего на выходе формируется исправленное предложение (на рис. 1 – Hello). Таким образом, модель коррекции состоит из кодера и декодера, реализуемых с помощью нейросети с пирамидальной двунаправленной RNN архитектурой, рассмотренной в работе [9]. Декодер использует так называемый «механизм внимания» для установления связи с закодированным представлением и посимвольной генерации выходного предложения.

Модель нейронной сети работает на уровне символов, как в кодировщике, так и в декодере. Это связано с тем, что известные нейронные модели машинного перевода на уровне слов с фиксированным словарем плохо подходят для обработки фрагментов, содержащих, например, многозначные числа, смайлики, веб-адреса и т.п. Несмотря на более длинные последовательности в модели на основе символов, работа системы коррекции не усложняется существенно, поскольку большая часть выполняемых здесь операций сводится к копированию символов из источника в целевой текст.

С учетом входного вектора  $x_i$ , прямые, обратные и комбинированные активации  $j$ -го скрытого слоя рассчитываются как:

$$\begin{aligned} f_i^{(j)} &= GRU(f_{i-1}^{(j)}, c_i^{(j-1)}), \\ b_i^{(j)} &= GRU(b_{i+1}^{(j)}, c_i^{(j-1)}), \\ h_i^{(j)} &= f_i^{(j)} + b_i^{(j)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где GRU – функция краткосрочной памяти рекуррентного блока RNN.

При  $j=0$   $c_i^{(0)} = x_i$ ,

Входные данные предыдущего входного слоя ( $j > 0$ ):

$$c_i^{(j)} = \tanh(W_{pyr}^j [h_{2i}^{(j-1)}, h_{2i+1}^{(j-1)}]^T + b_{pyr}^j). \quad (4)$$

Матрица весов  $W_{pyr}$  вдвое сокращает количество скрытых состояний для каждого дополнительного скрытого слоя, и, следовательно, кодировщик имеет пирамидальную структуру. В заключительном скрытом слое формируется закодированное представление входного предложения.

Сеть декодера является рекуррентной нейронной сетью, содержащей рекуррентные блоки с  $M$  скрытыми слоями. После конечного скрытого слоя сеть задает условие для закодированного представления результата, используя механизм внимания.

На  $j$ -ом слое декодера скрытые активации вычисляются следующим образом:

$$d_i^{(j)} = GRU(d_{i-1}^{(j)}, d_i^{(j-1)}), \quad (5)$$

где  $d_i^{(M)}$  – значение выходного скрытого слоя.

После этого взвешенную сумму закодированных скрытых состояний связывают с  $d_i^{(M)}$ , после чего получают окончательный выходной слой результирующей функции.

Для того, чтобы отфильтровать ложные правки, в предлагаемом методе использован классификатор редактирования правок. Запускается классификатор на нескорректированных предложениях из обучающих данных для генерации потенциально исправленных предложений. Затем согласовывается потенциальные предложения с нескорректированными путем минимизации расстояния Левенштейна на уровне слова между каждым потенциальным и неисправленным предложением. Расстояние Левенштейна выражается здесь следующими рекуррентными соотношениями:

$$d_L(a_1 \dots a_n a_{n+1}, b_1 \dots b_m b_{m+1}) = \min \begin{cases} d_L(a_1 \dots a_n, b_1 \dots b_m b_{m+1}) + 1 \\ d_L(a_1 \dots a_n a_{n+1}, b_1 \dots b_m) + 1 \\ d_L(a_1 \dots a_n, b_1 \dots b_m) + 1 \end{cases}$$

где учитывается возможность осуществления таких операции коррекции, как удаление символа  $a_{n+1}$ , вставки элемента  $b_{m+1}$ , изменение элемента  $a_{n+1}$  на  $b_{m+1}$  при  $a_{n+1} \neq b_{m+1}$ .

Для упрощения вычислительной процедуры в классификаторе используется нормированное представление расстояний Левенштейна:

$$d_{L1}(a_1 \dots a_n, b_1 \dots b_m) = \frac{d_L(a_1 \dots a_n, b_1 \dots b_m)}{\max(n, m)}. \quad (6)$$

Для формирования редакционных предписаний будем использовать алгоритм Хиршберга [11]. В соответствии с этим алгоритмом идея рекурсивного отображения последовательности  $a_1 \dots a_i$  в последовательность  $b_1 \dots b_j$  основывается на следующих равенствах:

$$d_L(a_1 \dots a_n, b_1 \dots b_m) = d_L(a_n \dots a_1, b_m \dots b_1)$$

$$\begin{aligned} &= d_L(a_1 \dots a_i a_{i+1} \dots a_n, b_1 \dots b_m) = \\ &= \min_{j=1, \dots, m-1} (d_L(a_1 \dots a_i, b_1 \dots b_j) + d_L(a_{i+1} \dots a_n, b_{j+1} \dots b_m)) \end{aligned}$$

Эти равенства позволяют построить вычислительные процедуры алгоритма Хиршберга для



различного соотношения количества элементов во входной и выходной последовательностях.

Смежные сегменты предложений, которые не совпадают после реализации этого алгоритма, извлекаются в процессе предложенных правок.

При нейросетевой реализации схемы «кодер-декодер» входное предложение произвольной длины должно быть сжато в вектор фиксированного размера. Этот подход кажется довольно странным, учитывая то, Кроме того, качество обработки существенно снижается, если модель «кодер-декодер» имеет малый размер. Таким образом, для успешной обработки длинных предложений мощность кодера должна быть значительной. Топология модели, реализующей алгоритм коррекции, и ее алгоритм обучения должны быть такими, чтобы данные большой размерности можно было бы передавать со входа нейронной сети на ее выходы через канал сравнительно небольших размеров. Для реализации сжатия такого рода может использоваться многослойный персептрон следующей архитектуры: количество нейронов во входном и выходном слое одинаково и равно размерности сжимаемых данных; между этими слоями располагаются один или более промежуточных слоев меньшего размера. Число промежуточных слоев определяет степень сложности преобразования данных.

Требованиям, необходимым на реализации процедур сжатия данных в процессе коррекции, удовлетворяет автоассоциативный трехслойный персептрон типа «Бутылочное горлышко», структура которого приведена на рис.2. [11].

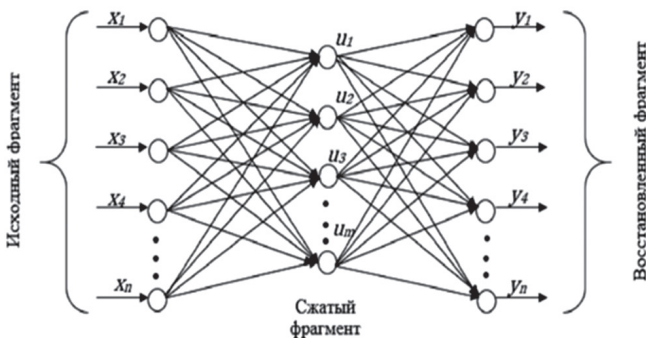


Рис. 2. Многослойный персептрон с архитектурой типа «бутылочное горлышко»

Обучение такого персептрона может быть осуществлено с помощью любой процедуры обратного распространения ошибок с тем отличием, что в качестве обучающего образа  $d(k)$  используется сам входной сигнал  $x(k)$ , подлежащий сжатию. Отметим, что на нулевой слой поступает  $n$ -мерный вектор входных сигналов  $x(k)$  ( $n_0 = n$ ), первый скрытый слой содержит  $n_1 = n$  нейронов, второй скрытый слой  $n$  нейронов и выходной слой —  $n_3 = n$  нейронов. Целью ассоциативного обучения является восстановление на выходе сети сигнала, наилучшим образом аппроксимирующего входной сигнал  $x(k)$ . Сжатие информации происходит во втором скрытом слое, содержащем меньшее число

нейронов, чем первый и выходной слою. Именно с выхода второго скрытого слоя снимается «сжатый» сигнал. Отметим, что такая архитектура имеет преимущество перед обычными многослойными персептронами по скорости обучения.

#### 4. Результаты тестирования

Для проведения тестирования использовался словарь, который включал 98 символов: набор печатных символов ASCII, специальных символов < sos >, < eos > и < unk >, обозначающих начало, конец предложения и неизвестные символы соответственно. В эксперименте был использован набор данных, который был получен из набора общих задач CoNLL, который содержит около 80 тысяч предложений из рефератов, написанных учащимися, изучающими английский язык с исправлениями и описаниями типов ошибок. На рис. 3 приведен пример экранной формы с результатом коррекции.

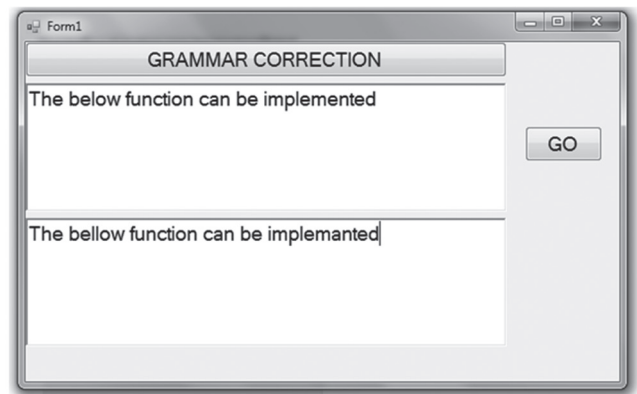


Рис. 3. Пример экранной формы с результатом коррекции

Результаты эксперимента свидетельствуют о приемлемом качестве исправления грамматических и морфологических ошибок при применении модифицированного нейросетевого RNN - метода. В частности, из 345 ошибок и опечаток, связанных с отсутствием, вставкой и заменой букв в исходных тестах, были обнаружены и исправлены 332 ошибки.

#### Выводы

В данном докладе исследована эффективность использования нейронных сетей в системах анализа англоязычных электронных текстов с целью исправления грамматических и морфологических ошибок и разработана модификация GEC -метода с использованием рекуррентной нейронной сети. Предложенный подход к коррекции ошибок на базе естественного языка, основан на применении нейросетевой реализации кодера и декодера, обучаемых на основе корпуса параллельных текстов, содержащего правильные и неправильные предложения. Кодер сопоставляет входное предложение с представлением более высокого уровня с пирамидальной двунаправленной RNN архитектурой.



Декодер также является рекуррентной нейронной сетью, которая использует механизм внимания на основе содержимого кодера для установления связи с закодированным представлением и посимвольной генерации выходного предложения. Для фильтрации ложных правок был использован специальный классификатор редактирования. Предварительно отредактированные предложения согласовываются с исходными путем минимизации расстояния Левенштейна.

Перспективным развитием метода является проведение экспериментов по усовершенствованию схемы нейросетевой коррекции путем учета более сложных типов ошибок и применения комбинированных нейросетевых архитектур GEC-систем.

#### Список литературы:

1. *Lizunov P.* Near-duplicate detection for tables on the base of the local-sensitive hashing and the nearest neighbor search methods / . Lizunov, A. Biloshchytskyi, A. Kuchansky, S. Biloshchytska, L. Chala // – Eastern-European Journal of enterprise technologies. – 2016 – №6 – P. 4– 10.
2. *Sutskever I.* Sequence to Sequence Learning with Neural Networks [Text] / I. Sutskever, O. Vinyals, Q. V. Le // In Advances in Neural Information Processing Systems. – 2014. – P. 3104–3112.
3. *Luong T.* Addressing the Rare Word Problem in Neural Machine Translation / T. Luong, I. Sutskever, Q. Le // – In Proceedings of the ACL-IJCNLP. – 2013. – P. 11 – 19.
4. *Mikolov T.* Efficient estimation of word representations in vector space / T. Mikolov, K. Chen, G. Corrado, J. Dean // In Proceedings of Workshop at ICLR. – 2013. – 12p.
5. *Mikolov T.* Distributed representations of words and phrases and their compositionality / T. Mikolov, I. Sutskever, K. Chen // – In Proceedings of NIPS. – 2013. – 9 p.
6. *Kalchbrenner N.* Recurrent Continuous Translation Models / N Kalchbrenner, P. Blunsom // – In Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. – 2013. – P. 1700 – 1709.
7. *Бойцов Л.М.* Использование хеширования по сигнатуре для поиска по сходству / Л.М. Бойцов // Прикладная математика и информатика. – М.: МГУ. – 2001. – № 8. – С. 135 – 154.
8. *Russo, L.* Approximate String Matching with Compressed Indexes / L. Russo, G. Navarro, A. Oliveira, P. Morales // Algorithms. – 2009. – P. 1105 – 1136.
9. *Bahdanau, D.* Neural Machine Translation by Jointly Learning to Align and Translate [Text] / D. Bahdanau, K. Cho, Y. Bengio // CoRR, abs/1409.0473, – 2014. – 15 p.
10. *Hirschberg D. S.* A linear space algorithm for computing maximal common subsequences / D. S. Hirschberg // Communications of the ACM. – 1975. – Vol. 18, no. 6. P. 871–883.
11. *Ham, F. M.* Principles of Neurocomputing for Science & Engineering. [Text] / F. M. Ham, I. Kostanic – N.Y.: Mc Graw-Hill, Inc., 2001. – 642 p.

Поступила в редколлегию 23.06.2017



И.В. Гребенник<sup>1</sup>, А.А. Коваленко<sup>2</sup>, Т.Е. Романова<sup>3</sup>, И.А. Урняева<sup>4</sup>, С.Б.Шеховцов<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, igor.grebennik@nure.ua;

<sup>2</sup>ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, hanna.kovalenko@nure.ua;

<sup>3</sup>ИПМаш им. А.М. Подгорного НАН України,

г. Харьков, Украина, sherom@kharkov.ua;

<sup>4</sup>ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, inna.urniaieva@nure.ua;

<sup>5</sup>ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, tarom7@yahoo.com

## ЗАДАЧА БАЛАНСНОЙ КОМПОНОВКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ЕЕ КОМБИНАТОРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

Рассматривается оптимизационная задача балансной компоновки заданного множества цилиндрических объектов в контейнере, разделенном круговыми стеллажами на подконтейнеры. Для аналитического описания условий пересечения цилиндров и размещения цилиндров в подконтейнерах используется метод  $\rho$ -функций. Строится математическая модель, в которой учитываются комбинаторные особенности задачи, связанные с генерацией разбиений множества объектов, размещаемых внутри подконтейнеров, при проектировании компоновки. Приводятся результаты численных экспериментов для решения задач компоновки цилиндров с целью: минимизации отклонения центра масс системы от заданной точки; минимизации радиуса основания цилиндрического контейнера с учетом равновесия системы.

БАЛАНСНАЯ КОМПОНОВКА, ЦИЛИНДРЫ, МЕТОД  $\rho$ -ФУНКЦИЙ, КОМБИНАТОРНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ОПТИМИЗАЦИЯ

### Введение

Задачи балансной компоновки 3D-объектов имеют широкий спектр практических применений, например, в космическом машиностроении [1]. Так в работах [2-5] рассматриваются задачи компоновки цилиндров в цилиндрическом контейнере с ограничениями поведения, учет которых необходим для соблюдения уравновешенности спутниковой системы. В данных публикациях приводятся математические модели с различными функциями цели. Для решения данных задач предлагаются эвристические алгоритмы, учитывающие особенности каждой из задач.

В статьях [6-7] приводятся математические модели и методы решения задач балансной компоновки (Balance Layout Problem, BLP) множества 3D-объектов в контейнере (формы цилиндра, параболоида вращения или усеченного конуса). Контейнер разделен круговыми стеллажами на подконтейнеры. При этом предполагается, что разбиение множества объектов на подмножества в соответствии с размещением объектов внутри подконтейнеров считается заданным.

Целью исследования является построение математической модели задачи оптимальной балансной компоновки множества цилиндрических объектов, в которой учитываются комбинаторные особенности задачи, связанные с генерацией разбиений множества объектов, размещаемых внутри подконтейнеров, при проектировании компоновки.

### 1. Постановка задачи

Пусть  $\Omega$  – контейнер высоты  $H$ , описанный следующим образом:

$$\Omega = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : G(x, y, z) \geq 0\}.$$

В пределах данного исследования рассматриваются контейнеры трех видов: *прямой круговой цилиндр* с радиусом основания  $R$  при  $G = \min\{-x^2 - y^2 + R^2, -z + H, z\}$ ; *параболоид вращения* с радиусом вращения  $R = \sqrt{H}$  при  $G = \min\{-z - x^2 - y^2 + H, z\}$ ; *усеченный прямой круговой конус* с радиусами  $R_1$  нижнего и  $R_2$  верхнего оснований, при

$$G = \min\{-z - \frac{H}{R_1 - R_2}(\sqrt{x^2 + y^2} + R_1), -z + H, z\}.$$

Контейнер  $\Omega$  задан в собственной неподвижной системе координат  $Oxyz$ , где  $Oz$  – продольная ось симметрии.

Полагаем, что  $\Omega$  разделен круговыми стеллажами  $S_j$  на отсеки  $\Omega^j$ ,  $j \in J_m = \{1, \dots, m\}$ . Расстояния между стеллажами  $S_j$  и  $S_{j+1}$  обозначим через  $t_j$ ,  $j \in J_m$ ,  $\sum_{j=1}^m t_j = H$ .

Начало собственной системы координат  $Oxyz$  расположено в центре нижнего основания контейнера (рис. 1).

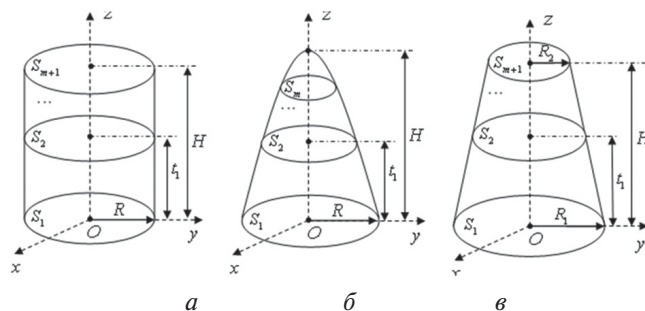


Рис. 1. Виды контейнеров с круговыми стеллажами:

а – цилиндр, б – параболоид вращения, в – усеченный конус

Имеется  $A = \{C_i, i = 1, \dots, n\}$  – множество одно-родных цилиндров с метрическими характеристиками  $(r_i, h_i)$ , где  $r_i$  – радиус основания,  $h_i$  – полу-высота цилиндра  $C_i$  (рис. 2),  $m_i$  – масса  $C_i$ .

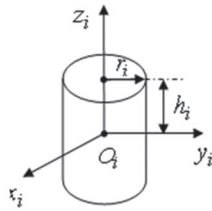


Рис. 2. Размещаемый цилиндр  $C_i$

Каждый цилиндр  $C_i$  задан в собственной системе координат  $O_i x_i y_i z_i$ , где  $O_i$  – центр симметрии  $C_i$ ,  $O_i z_i$  – продольная ось симметрии  $C_i$ ,  $O_i z_i \parallel O z$ . Пусть  $m_i$  – масса цилиндра  $C_i$ ,  $i \in J_n = \{1, \dots, n\}$ . Расположение цилиндра  $C_i$  внутри контейнера  $\Omega$  определяется вектором трансляции  $u_i = (v_i, z_i)$  относительно неподвижной системы координат  $O x y z$ , где  $v_i = (x_i, y_i)$ , при этом значение  $z_i$ ,  $i \in J_n$ , однозначно определяется подконтейнером  $\Omega^j$ ,  $j \in J_m$ , в котором размещается цилиндр  $C_i$ . На размещение  $C_i$ ,  $i \in J_n$ , внутри  $\Omega^j$  накладываются ограничения

$$z_i = \sum_{l=1}^j t_{l-1} + h_i, \quad (1)$$

где  $j \in J_m$ . Полагаем, что  $t_0 = 0$  и  $\forall i \in J_n$  существует  $j^* \in J_m : h_i \leq t_{j^*}$ .

В отличие от задач BLP, рассмотренных в работах [6, 7], где априори задано требование на размещение объектов в конкретных подконтейнерах  $\Omega^j$ ,  $j \in J_m$ , в данном исследовании формулируется задача балансной компоновки цилиндрических объектов, которая предполагает генерацию и выбор разбиения множества  $A$  на непустые подмножества  $A^j$ ,  $j \in J_m$ . Здесь  $A^j$  – подмножество объектов, которые должны быть размещены на стеллаже  $S_j$  внутри подконтейнера  $\Omega^j$ .

Пусть  $J_n^j \subseteq J_n$  – множество индексов объектов, размещаемых в подконтейнере  $\Omega^j$ ,  $j \in J_m$ ,  $\bigcup_{j=1}^m J_n^j = J_n$ ,  $J_n^i \cap J_n^j = \emptyset$ ,  $i \neq j \in J_m$ ;  $k_j = |A^j|$  – количество объектов, размещаемых в подконтейнере  $\Omega^j$ ,  $k_j > 0$ ,  $j \in J_m$ , при этом,

$$\sum_{j=1}^m k_j = n. \quad (2)$$

На суммарную массу объектов, размещаемых в подконтейнерах  $\Omega^j$ ,  $j \in J_m$ , накладывается ограничение:

$$\sum_{i=1}^{k_1} m_i \geq \sum_{i=k_1+1}^{k_1+k_2} m_i \geq \dots \geq \sum_{i=k_1+k_2+\dots+k_{m-1}+1}^n m_i, \quad (3)$$

где  $k_j = |A^j| \geq 1$ ,  $j \in J_m$ .

Кроме того, должны выполняться следующие ограничения размещения:

$$\text{int}C_{i_1} \cap \text{int}C_{i_2} = \emptyset, \quad i_1 < i_2 \in J_n^j, \quad j \in J_m, \quad (4)$$

$$C_i \subset \Omega^j, \quad i \in J_n^j, \quad j \in J_m, \quad (5)$$

$$h^j \leq t_j, \quad h^j = \max\{h_i^j, i \in J_n^j\}, \quad j \in J_m. \quad (6)$$

Обозначим через  $\Omega_A$  систему, образованную в результате размещения цилиндров  $C_i$  семейства  $A$  в контейнере  $\Omega$ , а через  $O_s XYZ$  – систему координат  $\Omega_A$ , где  $O_s = (x_s(v), y_s(v), z_s(v))$  – центр масс  $\Omega_A$ , а оси  $O_s X \parallel O x$ ,  $O_s Y \parallel O y$ ,  $O_s Z \parallel O z$ ,

$$x_s(v) = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{M}, \quad y_s(v) = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{M}, \quad z_s = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{M}, \quad (7)$$

$$M = \sum_{i=1}^n m_i \text{ – масса системы } \Omega_A.$$

В качестве функций цели в данном исследовании рассматриваются:

- отклонение центра масс  $O_s$  системы  $\Omega_A$  от заданной точки  $(x_0, y_0, z_0)$ ;
- метрические характеристики контейнера  $\Omega$ .

*Комбинаторная задача балансной компоновки (Combinatorial Balance Layout Problem, CBLP).* Определить такой вариант разбиения множества  $A$  на подмножества  $A^j$ ,  $j \in J_m$  с учетом ограничений (2)-(6), и параметры размещения  $(x_i^*, y_i^*, z_i^*)$  цилиндров  $C_i$ ,  $i \in J_n$ , при котором функция цели достигала бы своего минимального значения.

Полагаем, что задача имеет хотя бы одно допустимое решение.

Варианты разбиения множества  $A$  на непустые подмножества  $A^j$ ,  $j \in J_m$ , определяются количеством элементов в каждом подмножестве и порядком следования подмножеств. Рассмотрим подконтейнеры  $\Omega^j$  и соответствующие им множества объектов  $A^j$ ,  $j \in J_m$ . Тогда кортеж натуральных чисел  $(k_1, k_2, \dots, k_m)$ , такой что  $\sum_{j=1}^m k_j = n$ , определяет возможное количество  $k_j$  объектов в каждом подконтейнере  $\Omega^j$ . Количество всех таких кортежей равно числу композиций числа  $n$  длины  $m$ , которое составляет  $C_{n-1}^{m-1}$ .

Рассмотрим теперь, сколькими способами можно разложить  $n$  различных объектов из множества  $A$  в  $m$  подконтейнеров  $\Omega^j$ ,  $j \in J_m$ , при условии, что в подконтейнерах находится соответственно  $k_1, k_2, \dots, k_m$  объектов, причем множества объектов  $A^j$ ,  $j \in J_m$ , внутри соответствующих подконтейнеров  $\Omega^j$ ,  $j \in J_m$ , не упорядочены. Не теряя общности, будем различать цилиндры с одинаковыми значениями метрических характеристик  $r_i, h_i$  и масс  $m_i$  (например, считать их различающимися по номеру).

Упорядочим элементы множества  $A$ . Каждому цилиндру поставим в соответствие номер подконтейнера, в который он будет помещен. Получим кортеж, состоящий из  $n$  элементов, которые образуют перестановку с повторениями из  $m$  номеров  $1, 2, \dots, m$ , в которой первый элемент (номер первого подконтейнера) повторяется  $k_1$  раз, второй —  $k_2$  раз, ..., последний —  $k_m$  раз. Каждая такая перестановка определяет свой способ раскладки, а их общее число равно

$$P(n, k_1, k_2, \dots, k_m) = \frac{n!}{k_1! \cdot k_2! \cdot \dots \cdot k_m!}. \quad (8)$$

Тогда количество вариантов распределения  $n$  различных цилиндров из множества  $A$  по  $m$  подконтейнерам  $\Omega^j$  при условии, что каждый подконтейнер содержит хотя бы один объект и порядок размещения объектов внутри подконтейнера не важен, равно

$$\begin{aligned} & \sum_{k_1+k_2+\dots+k_m=n} P(n, k_1, k_2, \dots, k_m) = \\ & = \sum_{k_1+k_2+\dots+k_m=n} \frac{n!}{k_1! \cdot k_2! \cdot \dots \cdot k_m!} \end{aligned} \quad (9)$$

Заметим, что число слагаемых в сумме равно числу разбиений числа  $n$  на  $m$  натуральных слагаемых, которое составляет  $N = C_{n-1}^{m-1}$ .

Для генерации различных вариантов подмножеств  $A^j$ ,  $j \in J_m$ , построим комбинаторную конфигурацию следующим образом.

Обозначим  $Pt(n, m)$  множество разбиений числа  $n$  на  $m$  натуральных слагаемых (соответствует распределению  $n$  различных цилиндров из множества  $A$  по  $m$  подконтейнерам  $\Omega^j$ ,  $j \in J_m$ , при условии, что каждый подконтейнер содержит хотя бы один объект и порядок объектов внутри подконтейнера не важен).

$$\text{При этом, } |Pt(n, m)| = N = C_{n-1}^{m-1}.$$

Пусть  $(k_1, k_2, \dots, k_m) \in Pt(n, m)$ ,  $\sum_{j=1}^m k_j = n$ ,  $k_i \geq 1$ ,  $i \in J_m$ .

Введем комбинаторное множество  $\mathbb{Q}$ , которое представляет собой композиционный образ комбинаторных множеств ( $k$ -множество)  $Pt(n, m)$ ;  $C_n^{k_1}$ ,  $C_{n_1}^{k_2}$ ,  $C_{n_2}^{k_3}$ , ...,  $C_{n_{m-1}}^{k_m}$ , порожденный множествами  $I_n$ ,  $I_{n_1}$ ,  $I_{n_2}$ , ...,  $I_{n_{m-1}}$  [8], где

$$n_i = n - k_1 - \dots - k_i, \quad i \in J_{m-1},$$

$$I_{n_0} = J_n,$$

$$I_{n_1} = I_{n_0} \setminus \{j_1^{n_0}, j_2^{n_0}, \dots, j_{k_1}^{n_0}\}, \quad (j_1^{n_0}, j_2^{n_0}, \dots, j_{k_1}^{n_0}) \in C_n^{k_1},$$

$$I_{n_2} = I_{n_1} \setminus \{j_1^{n_1}, j_2^{n_1}, \dots, j_{k_2}^{n_1}\}, \quad (j_1^{n_1}, j_2^{n_1}, \dots, j_{k_2}^{n_1}) \in C_{n_1}^{k_2},$$

...

$$I_{n_{m-1}} = I_{n_{m-2}} \setminus \{j_1^{n_{m-2}}, j_2^{n_{m-2}}, \dots, j_{k_{m-1}}^{n_{m-2}}\},$$

$$(j_1^{n_{m-2}}, j_2^{n_{m-2}}, \dots, j_{k_{m-1}}^{n_{m-2}}) \in C_{n_{m-2}}^{k_{m-1}},$$

$$I_{n_{m-1}} = \{j_1^{n_{m-1}}, j_2^{n_{m-1}}, \dots, j_{k_m}^{n_{m-1}}\}, \quad (j_1^{n_{m-1}}, j_2^{n_{m-1}}, \dots, j_{k_m}^{n_{m-1}}) \in C_{n_{m-1}}^{k_m}.$$

Отметим, что

$$I_{n_0} \cup I_{n_1} \cup \dots \cup I_{n_{m-1}} = J_n = \{1, 2, \dots, n\}.$$

$$I_{n_s} \cap I_{n_t} = \emptyset, \quad s \neq t \in J_{m-1} = \{0, 1, \dots, m-1\}.$$

Элемент  $q = (q_1, \dots, q_n) \in \mathbb{Q}$  может быть описан следующим образом:

$$q = (q_1, \dots, q_{k_1}, q_{k_1+1}, \dots, q_{k_1+k_2}, \dots, q_{k_1+\dots+k_{m-1}}, \dots, q_{k_1+\dots+k_m}),$$

$$\text{где } (q_1, \dots, q_{k_1}) = (j_1^{n_0}, j_2^{n_0}, \dots, j_{k_1}^{n_0}) \in C_n^{k_1},$$

$$(q_{k_1+1}, \dots, q_{k_1+k_2}) = (j_1^{n_1}, j_2^{n_1}, \dots, j_{k_2}^{n_1}) \in C_{n_1}^{k_2},$$

...

$$\begin{aligned} & (q_{k_1+\dots+k_{m-1}}, \dots, q_{k_1+\dots+k_m}) = \\ & = (j_1^{n_{m-1}}, j_2^{n_{m-1}}, \dots, j_{k_m}^{n_{m-1}}) \in C_{n_{m-1}}^{k_m}. \end{aligned}$$

Мощность множества  $\mathbb{Q}$  определяется формулой (9).

В дальнейшем будем называть элемент  $q = (q_1, \dots, q_n)$  множества  $\mathbb{Q}$  кортежем разбиения множества объектов  $A$  на подмножества  $A^j$ ,  $j \in J_m$ .

Определим вектор переменных задачи СБЛР:  $u = (v, z)$ , где  $v = (v_1, \dots, v_n) \in \mathbb{R}^{2n}$ ,  $v_i = (x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2$ ,  $x_i, y_i$  — непрерывные переменные,  $z = (z_1, \dots, z_n) \in \mathbb{R}^n$ ,  $z_i$  — дискретные переменные.

Значения переменных  $z_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , определяются в порядке, задаваемом элементами  $q = (q_1, \dots, q_n)$  комбинаторного множества  $\mathbb{Q}$  следующим образом:

$$z_{q_i} = \sum_{l=1}^s t_{l-1} + h_{q_i}, \quad (10)$$

где

$$s = \begin{cases} 1, & \text{если } i \leq k_1, \\ 2, & \text{если } k_1 < i \leq k_1 + k_2, \\ \dots & \\ m, & \text{если } k_1 + k_2 + \dots + k_{m-1} < i \leq k_1 + k_2 + \dots + k_m, \end{cases}$$

$i = 1, 2, \dots, n$ ,  $q_i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $q = (q_1, \dots, q_n) \in \mathbb{Q}$ .

Ограничения размещения цилиндров множества  $A$  в контейнере  $\Omega$  вида (4), (5) описываются системой неравенств  $\Upsilon_1(u) \geq 0$ ,  $\Upsilon_2(u) \geq 0$ , где  $\Upsilon_1(u) \geq 0$  — ограничение, описывающее непересечение цилиндров,  $\Upsilon_2(u) \geq 0$  — ограничение, описывающее включение цилиндров в  $\Omega$ , где

$$\Upsilon_1(u) = \min\{\Upsilon_1^j(u), j \in J_m\},$$

$$\Upsilon_1^j(u) = \min\{\Upsilon_{q_1 q_2}^j(u_{q_1}, u_{q_2}), q_1 < q_2 \in J_n^j\}, \quad (11)$$

$$\Upsilon_2^*(u) = \min\{\Upsilon_2^{*j}(u), j \in J_m\},$$

$$\Upsilon_2^{*j}(u) = \min\{\Upsilon_{q_i}^{*j}(u_{q_i}), q_i \in J_n^j\}, \quad (12)$$

$\Upsilon_{q_1 q_2}^j(u_{q_1}, u_{q_2})$  — функция, описывающая условие непересечения цилиндров  $\mathbb{C}_{q_1}$  и  $\mathbb{C}_{q_2}$ ,  $u_{q_1} = (x_{q_1}, y_{q_1}, z_{q_1})$ ,  $u_{q_2} = (x_{q_2}, y_{q_2}, z_{q_2})$ ,  $\Upsilon_{q_i}^{*j}(u_{q_i})$  — функция, описывающая условие непересечения цилиндра  $\mathbb{C}_{q_i}$  и объекта



$$\Omega^{*j} = \mathbb{R}^3 / \text{int} \Omega^j.$$

Заметим, что при фиксированных значениях  $z_{q_1}$  и  $z_{q_2}$  имеем:

$\Upsilon_{q_1, q_2}^j(u_{q_1}, u_{q_2}) = \Phi_{q_1, q_2}^{\text{CC}}(u_{q_1}, u_{q_2})$  – *phi*-функция для цилиндров  $\mathbb{C}_{q_1}$  и  $\mathbb{C}_{q_2}$  [9],

$\Upsilon_{q_i}^*(u_{q_i}) = \Phi_{q_i}^{\text{C}\Omega^{*j}}(u_{q_i})$  – *phi*-функция для цилиндра  $\mathbb{C}_{q_i}$  и объекта  $\Omega^{*j}$  [6].

Поскольку объекты из множества  $A^j = \{\mathbb{C}_{q_i}, q_i \in J_n^j\}$ , располагаются на стеллаже подконтейнера  $\Omega^j$ , то *phi*-функцию  $\Phi_{q_1, q_2}^{\text{CC}}(u_{q_1}, u_{q_2})$  можно представить в эквивалентном виде:

$$\begin{aligned} \Phi_{q_1, q_2}(v_{q_1}, v_{q_2}) &= \\ &= (x_{q_2} - x_{q_1})^2 + (y_{q_2} - y_{q_1})^2 - (r_{q_2} + r_{q_1})^2, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $v_{q_1} = (x_{q_1}, y_{q_1}), v_{q_2} = (x_{q_2}, y_{q_2})$ ,

а *phi*-функция  $\Phi_{q_i}^{\text{C}\Omega^{*j}}(u_{q_i})$  примет вид

$$\Phi_{q_i}(R, v_{q_i}) = -x_{q_i}^2 - y_{q_i}^2 + (R_{q_i}^z(R) - r_{q_i})^2, \quad (14)$$

$R_{q_i}^z(R)$  – радиус «подконтейнера»  $C^z$  (сечение контейнера  $\Omega$  плоскостью, параллельной  $Oxу$ , на высоте  $z_i + h_i$ ),  $R_{q_i}^z(R) \geq r_{q_i}$ ;

$R_{q_i}^z = \sqrt{H - 2h_{q_i} - \sum_{l=1}^j t_{l-1}}$ ,  $q_i \in J_n^j$ ,  $j=1, \dots, m$ , для параболического контейнера;  $R_{q_i}^z = R$ ,  $q_i \in J_n^j$ ,  $j=1, \dots, m$ , для цилиндрического контейнера;  $R_{q_i}^z = R_1 - ((2h_{q_i} + \sum_{l=1}^j t_{l-1}) \setminus H)(R_1 - R_2)$ ,  $q_i \in J_n^j$ ,  $j=1, \dots, m$ , для контейнера формы усеченного конуса.

## 2. Математическая модель

Математическую модель задачи СBLP можно определить следующим образом:

$$F(u^*) = \min F(u) \text{ s.t. } u \in W, \quad (15)$$

$$W = \{u \in \mathbb{R}^\sigma : \Upsilon_1(u) \geq 0, \Upsilon_2^*(u) \geq 0, \delta(u) \geq 0\}, \quad (16)$$

где  $u = (p, v, z)$ ,  $v = (v_1, \dots, v_n)$ ,  $v_i = (x_i, y_i)$ ,  $i=1, \dots, n$ ,  $z = (z_1, \dots, z_n)$ , функция  $\Upsilon_1(u)$  описывается соотношением (11) при  $\Xi = \bigcup_{j=1}^m \Xi^j$ ,  $\Xi^j = \{(q_1, q_2) : q_1 < q_2 \in J_n^j\}$ , функция  $\Upsilon_2^*(u)$  определяется формулой (12), элементы вектора  $z$  задаются соотношением (10), а  $\delta(u) \geq 0$  – дополнительная система ограничений на переменные метрические характеристики контейнера и параметры размещения объектов.

В данном исследовании рассматриваются две реализации математической модели (15)-(16).

Если рассматривается задача СBLP с целью минимизации отклонения центра масс  $O_s$  системы  $\Omega_A$  от заданной точки  $(x_0, y_0, z_0)$ , то математическая модель (15)-(16) примет вид

$$F(u^*) = F(v^*, z^*) = \min F(v, z) \text{ s.t. } u \in W, \quad (17)$$

$$F(v, z) = (x_s(v, z))^2 + (y_s(v, z))^2 + (z_s - z_0)^2, \quad (18)$$

$$W = \{(v, z) \in \mathbb{R}^{3n} : \Upsilon_1(v, z) \geq 0, \Upsilon_2^*(v, z) \geq 0\}, \quad (19)$$

где  $u = (v, z)$ ,  $v = (v_1, \dots, v_n)$ ,  $v_i = (x_i, y_i)$ ,  $i=1, \dots, n$ ,  $z = (z_1, \dots, z_n)$ , функция  $\Upsilon_1(v, z)$  описывается соотношением (11) при  $\Xi = \bigcup_{j=1}^m \Xi^j$ ,  $\Xi^j = \{(q_1, q_2) : q_1 < q_2 \in J_n^j\}$ , а функция  $\Upsilon_2^*(v, z)$  определяется формулой (12), а элементы вектора  $z$  задаются соотношением (10).

Таким образом, математическая модель задачи (17)-(19) примет вид:

$$\min d, \text{ s.t. } u = (v, z) \in W, \quad (20)$$

где  $v = (x_1, y_1, \dots, x_n, y_n), z = (z_1, \dots, z_n)$ ,

$$d = [\sum_{i=1}^n m'_i x_i]^2 + [\sum_{i=1}^n m'_i y_i]^2 + [\sum_{i=1}^n m'_i z_i]^2,$$

а область  $W$  описывается системой неравенств вида

$$\begin{cases} (x_{q_2} - x_{q_1})^2 + (y_{q_2} - y_{q_1})^2 - (r_{q_2} + r_{q_1})^2 \geq 0, \\ q_1, q_2 \in \Xi^j, j \in J_m, \\ -x_{q_i}^2 - y_{q_i}^2 + (R_{q_i}^z - r_{q_i})^2 \geq 0, \\ q_i \in \Xi^j, j \in J_m. \end{cases} \quad (21)$$

Заметим, что  $m'_i = \frac{m_i}{M} = \text{const}$ ,  $M = \sum_{i=1}^n m_i = \text{const}$ .

Если рассматривается задача СBLP с целью минимизации радиуса основания цилиндрического контейнера, то математическая модель (15)-(16) примет вид

$$F(R, u^*) = F(R, v^*, z^*) = \min F(R, v, z) \text{ s.t. } u \in W, \quad (22)$$

$$F(R, v, z) = R, \quad (23)$$

$$W = \{(R, v, z) \in \mathbb{R}^{3n+1} : \Upsilon_1(v, z) \geq 0, \Upsilon_2^*(R, v, z) \geq 0, \mu(R, v, z) \geq 0, R \geq r'\}, \quad (24)$$

где  $u = (v, z)$ ,  $v = (v_1, \dots, v_n)$ ,  $v_i = (x_i, y_i)$ ,  $i=1, \dots, n$ ,  $z = (z_1, \dots, z_n)$ , функция  $\Upsilon_1(v, z)$  описывается соотношением (11) при  $\Xi = \bigcup_{j=1}^m \Xi^j$ ,  $\Xi^j = \{(q_1, q_2) : q_1 < q_2 \in J_n^j\}$ , функция  $\Upsilon_2^*(R, v, z)$  определяется формулой (12), элементы вектора  $z$  задаются соотношением (10),  $r' = \max_{i=1, \dots, n} r_i$ , а условие  $\mu(R, v, z) \geq 0$  – ограничение равновесия, где

$$\mu(u) = \min\{\mu_1(u), \mu_2(u), \mu_3(u)\},$$

$$\mu_1(u) = \min\{-(x_e - x_c) + \Delta x_c, (x_e - x_c) + \Delta x_c\},$$

$$\mu_2(u) = \min\{-(y_e - y_c) + \Delta y_c, (y_e - y_c) + \Delta y_c\},$$

$$\mu_3(u) = \min\{-(z_e - z_c) + \Delta z_c, (z_e - z_c) + \Delta z_c\}.$$

Здесь  $(\Delta x_c, \Delta y_c, \Delta z_c)$  – допустимые отклонения от центра масс системы  $\Omega^A$ .

Таким образом, математическая модель задачи (22)-(24) примет вид:

$$\min R \text{ s.t. } (R, u) \in W, \quad (25)$$

где  $u = (v, z)$ ,  $v = (x_1, y_1, \dots, x_n, y_n)$ ,  $z = (z_1, \dots, z_n)$ , а  $W$  описывается системой неравенств вида

$$\left\{ \begin{array}{l} (x_{q_2} - x_{q_1})^2 + (y_{q_2} - y_{q_1})^2 - (r_{q_2} + r_{q_1})^2 \geq 0, \\ q_1, q_2 \in \Xi^j, j \in J_m \\ -x_{q_i}^2 - y_{q_i}^2 + (R_{q_i}^z - r_{q_i})^2 \geq 0, \\ q_i \in \Xi^j, j \in J_m, \\ (x_e - x_c) + \Delta x_c \geq 0, \\ (y_e - y_c) + \Delta y_c \geq 0, \\ (z_e - z_c) + \Delta z_c \geq 0, \\ -(x_e - x_c) + \Delta x_c \geq 0, \\ -(y_e - y_c) + \Delta y_c \geq 0, \\ -(z_e - z_c) + \Delta z_c \geq 0, \\ R - r' \geq 0. \end{array} \right. \quad (26)$$

Для решения задач СВЛР используется следующая стратегия:

1. Случайным образом генерируется множество  $\{q\}$  кортежей разбиения  $q = (q_1, \dots, q_n) \in \mathbb{Q}$  [10].
2. Осуществляется проверка выполнения условий (3), (6) для каждого из кортежей  $q \in \{q\}$ . Строится подмножество  $\{q'\} \subseteq \{q\}$ , для элементов которого выполняются обозначенные выше условия. Если  $\{q'\} = \emptyset$ , то возвращаемся к шагу 1.
3. Строится множество допустимых стартовых точек  $\{u'_0\}$  для каждого кортежа из множества  $\{q'\}$ , используя алгоритм, предложенный в [7].
4. Реализуется поиск локального экстремума задачи (15)-(16) для каждой стартовой точки  $u'_0 \in W$  при фиксированном кортеже  $q'$ . Для поиска локальных экстремумов используется NLP-решатель IPOPT [11].
5. Лучший из полученных локальных экстремумов для всех кортежей множества  $\{q'\}$  и допустимых стартовых точек множества  $\{u'_0\}$  выбирается в качестве локально-оптимального решения задачи СВЛР.

### 3. Результаты численных экспериментов

Рассматривается задача балансной компоновки  $n=8$  цилиндров (табл. 1) в цилиндрическом контейнере, разделенном двумя круговыми стеллажами на  $m=3$  подконтейнера с целью минимизации: отклонения центра масс системы  $\Omega_A$  от точки  $(0,0,0)$ ; радиуса основания цилиндрического контейнера с учетом ограничения равновесия системы  $\Omega_A$ .

Высота контейнера  $H=6$ , расстояние между стеллажами  $t_1=2$ ;  $t_2=2$ .

Таблица 1

Исходные данные о цилиндрах

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$
$m_i$	4	2	2	1	3	3	5	5
$r_i$	1	0.7	0.6	0.45	0.8	0.85	0.9	1
$h_i$	1.27	1.3	1.77	1.57	1.49	1.32	1.96	1.59

#### 3.1 Результаты численных экспериментов для задачи (20)-(21).

Значение функции цели  $R^*=1.9000$  при  $q^1 = (1, 4, 7, | 3, 5, 8, | 2, 6)$ .

Значение функции цели  $R^*=1.9167$  при  $q^2 = (3, 7, 8, | 1, 5, 6, | 2, 4)$ .

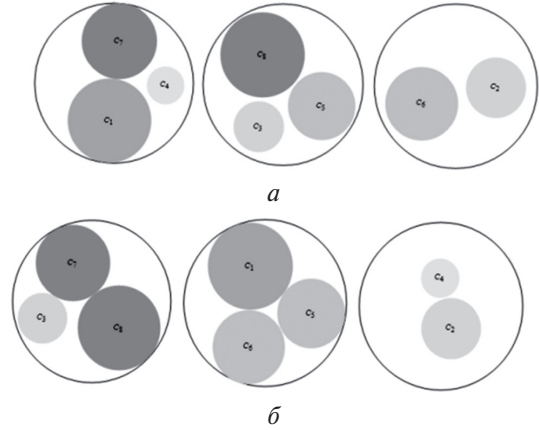


Рис. 3. Проекция локально-оптимальных размещений цилиндров в подконтейнерах, соответствующие  $a$  — кортежу  $q^1$ ;  $b$  — кортежу  $q^2$

На рис. 4 приведены локально-оптимальные размещения цилиндров в подконтейнерах  $\Omega^1, \Omega^2, \Omega^3$ , соответствующие кортежам  $q^1$  и  $q^2$ .

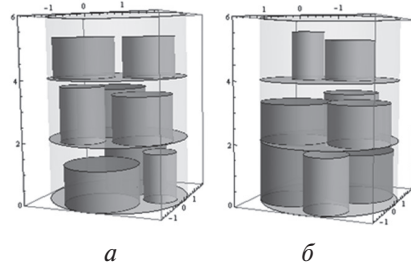


Рис. 4. Локально-оптимальные размещения цилиндров в подконтейнерах, соответствующие:  $a$  — кортежу  $q^1$ ;  $b$  — кортежу  $q^2$

Значение функции цели  $R^* = 2.2005$  при  $q^3 = (1, 5, 6, 8, | 2, 7, | 3, 4)$ .

Значение функции цели  $R^* = 2.2002$  при  $q^4 = (1, 3, 5, 6, | 7, 8, | 2, 4)$ .

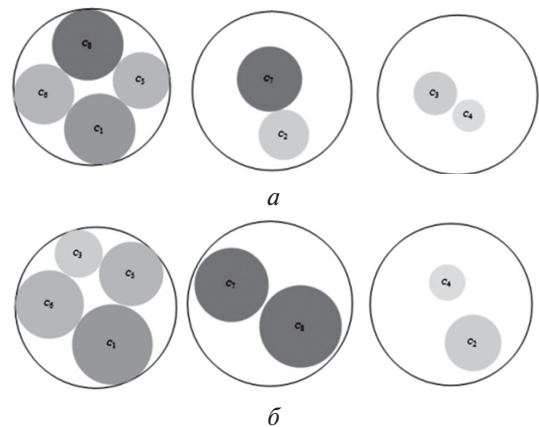


Рис. 5. Проекция локально-оптимальных размещений цилиндров в подконтейнерах, соответствующие  $a$  — кортежу  $q^3$ ;  $b$  — кортежу  $q^4$

На рис. 6 приведены локально-оптимальные размещения цилиндров в подконтейнерах  $\Omega^1, \Omega^2, \Omega^3$ , соответствующие кортежам  $q^3$  и  $q^4$ .

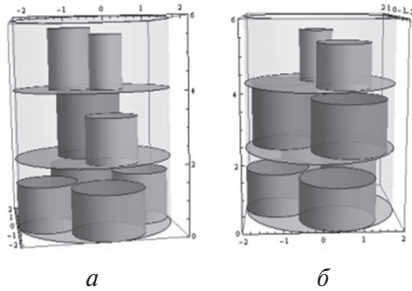


Рис. 6. Локально-оптимальные размещения цилиндров в подконтейнерах,

соответствующие:  $a$  – кортежу  $q^3$ ;  $b$  – кортежу  $q^4$

Наилучший результат  $R^*=1.9000$  получен для задачи (20)-(21) при  $q^1 = (1, 4, 7, | 3, 5, 8, | 2, 6)$ .

3.2 Результаты численных экспериментов для задачи (25)-(26).

Полагаем, что  $\Delta x_c = \Delta y_c = \Delta z_c = 0.01$ , а радиус контейнера равен  $R=2.5$ .

Значение функции цели  $d^*=0.3851$  при  $q^1 = (1, 4, 7, | 3, 5, 8, | 2, 6)$ .

Значение функции цели  $d^*=0.8847$  при  $q^2 = (3, 7, 8, | 1, 5, 6, | 2, 4)$ .

На рис. 7, 8 приведены локально-оптимальные размещения цилиндров в подконтейнерах  $\Omega^1, \Omega^2, \Omega^3$ , соответствующие кортежам  $q^1$  и  $q^2$ .

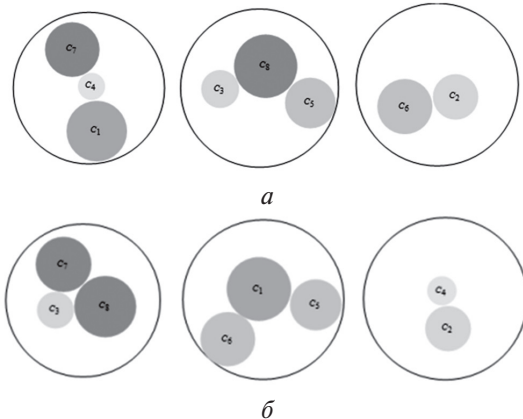


Рис. 7. Проекция локально-оптимальных размещений цилиндров в подконтейнерах,

соответствующие  $a$  – кортежу  $q^1$ ;  $b$  – кортежу  $q^2$

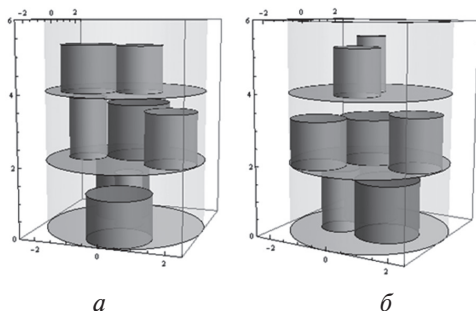
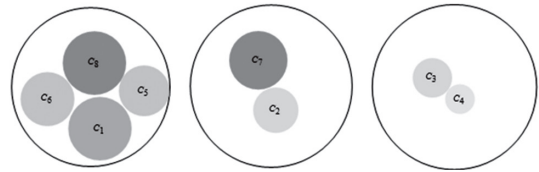


Рис. 8. Локально-оптимальные размещения цилиндров в подконтейнерах,

соответствующие:  $a$  – кортежу  $q^1$ ;  $b$  – кортежу  $q^2$

Значение функции цели  $d^*=1.3938$  при  $q^3 = (1, 5, 6, 8, | 2, 7, | 3, 4)$ .



Значение функции цели  $d^*=1.8847$  при  $q^4 = (1, 3, 5, 6, | 7, 8, | 2, 4)$ .

На рис. 9, 10 приведены локально-оптимальные размещения цилиндров в подконтейнерах  $\Omega^1, \Omega^2, \Omega^3$ , соответствующие кортежам  $q^3$  и  $q^4$ .

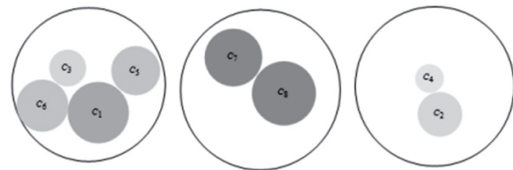


Рис. 9. Проекция локально-оптимальных размещений цилиндров в подконтейнерах,

соответствующие  $a$  – кортежу  $q^3$ ;  $b$  – кортежу  $q^4$

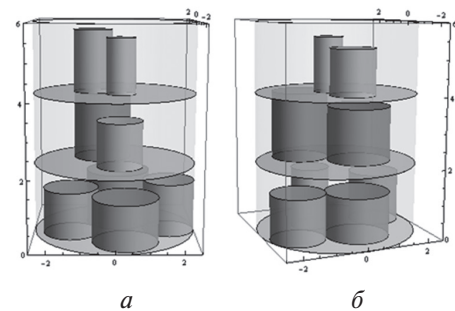


Рис. 10. Локально-оптимальные размещения цилиндров в подконтейнерах,

соответствующие:  $a$  – кортежу  $q^3$ ;  $b$  – кортежу  $q^4$

Наилучший результат  $d^*=0.3851$  получен для задачи (25)-(26) при  $q^1 = (1, 4, 7, | 3, 5, 8, | 2, 6)$ .

### Выводы

Рассмотрена задача балансной компоновки цилиндров в контейнере (прямой круговой цилиндр, параболоид вращения, усеченный круговой конус), разделенном круговыми стеллажами на подконтейнеры. Построена математическая модель, учитывающая не только ограничения размещения и ограничения поведения, но и комбинаторные особенности задачи, связанные с необходимостью построения разбиений множества размещаемых цилиндров по подконтейнерам. Предложена стратегия решения, которая включает процедуры: генерации кортежей разбиения; построения стартовых точек из области допустимых решений; локальной оптимизации. Данный подход использует принцип «мультистарта» для поиска «хороших» допустимых решений. Результаты численных экспериментов показали эффективность предложенного подхода для рассматриваемого класса задач балансной компоновки.

**Список литературы:**

1. Modeling and Optimization in Space Engineering. Series: Springer Optimization and Its Applications, Vol. 73, Fasano G, Pinte'r J.D. (Eds.), XII. – 2013. – 404 p.
2. Che C., Wang Y., Teng H. Test problems for quasi-satellite packing: Cylinders packing with behavior constraints and all the optimal solutions known. – Optimization Online (2008) [http://www.optimizationonline.org/DB\\_HTML/2008/09/2093.html](http://www.optimizationonline.org/DB_HTML/2008/09/2093.html)
3. Sun Z., Teng H. Optimal layout design of a satellite module. – Engineering optimization. – 2003. – Vol. 35, № 5. – P. 513-530.
4. Sun Z., Teng H. Optimal layout design of a satellite module. – Engineering optimization. – 2003. – Vol. 35, № 5. – P. 513-530.
5. Lei K. Constrained Layout Optimization Based on Adaptive Particle Swarm Optimizer. – Advances in Computation and Intelligence. Series: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Zhihua C., Zhenhua L., Zhuo K., Yong L. (Eds.). – 2009. – № 1. – P. 434-442.
6. A. A. Kovalenko, T. E. Romanova, P. I. Stetsyuk (2015) Balance layout problem for 3D-objects: mathematical model and solution methods. Cybernetics and Systems Analysis, Vol. 51, No. 4, P. 556-565, DOI 10.1007/s10559-015-9746-5
7. Stoyan Yu., Romanova T., Pankratov A., Kovalenko A., Stetsyuk P. (2016) Modeling and Optimization of Balance Layout Problems. Chapter (pp. 177-208) in contributed book Space Engineering. Modeling and Optimization with Case Studies/ Springer Optimization and Its Applications, Editors G. Fasano and J. Pinte'r, New York, Vol. 114, XV, 487 p.
8. Yu. G. Stoyan, I.V. Grebennik Description and Generation of Combinatorial Sets Having Special Characteristics // International Journal of Biomedical Soft Computing and Human Sciences, Special Volume “Bilevel Programming, Optimization Methods, and Applications to Economics” Vol. 18, №1, 2013. – P. 83-88.
9. Stoyan Yu., Romanova T. Mathematical Models of Placement Optimization: Two- and Three-Dimensional Problems and Applications – Modeling and optimization in space engineering. Series: Springer optimization and its applications. Fasano G, Pinte'r J.D. (Eds.), XII. – 2013. – Vol. 73. – P. 363-388.
10. Igor Grebennik, Random generation of combinatorial sets with special properties / Igor Grebennik, Oleksandr Lytvynenko // An International Quarterly Journal on Economics of Technology and Modelling Processes (ECONTECHMOD). – 2016. – Vol. 5, № 4. – pp. 43–48.
11. Wachter A., Biegler L.T. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. – Mathematical Programming. – 2006. – Vol. 106, № 1, P. 25-57.

Поступила до редколегії 27.03.2017



УДК 519.85



О.М. Хлуд<sup>1</sup>, Т.Е. Романова<sup>2</sup>, П.И. Стецюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ІПМаш ім. А.М.Підгорного НАН України, м. Харків, Україна, khlud.olga@gmail.com

<sup>2</sup> ІПМаш ім. А.М.Підгорного НАН України, м. Харків, Україна, sherom@kharkov.ua

<sup>3</sup> Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України,  
м. Київ, Україна, tarom27@yahoo.com

## О ДВУХ ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОЙ УПАКОВКИ ГОМОТЕТИЧЕСКИХ ЭЛЛИпсоИДОВ

Рассматриваются две задачи упаковки гомотетичных одинаково ориентированных эллипсоидов: в прямоугольном параллелепипеде минимального объема и в эллипсоиде с минимальным коэффициентом гомотетии. Строятся математические модели в виде задач нелинейного программирования. Предлагается два подхода к поиску эффективных локально оптимальных решений. Первый подход основан на  $g$ -алгоритме Шора. Второй подход использует гомотетические преобразования эллипсоидов, и оптимизационную процедуру, позволяющую свести задачу с большим числом неравенств к последовательности задач с меньшим числом неравенств. Предлагается алгоритм доупаковки. Приводятся результаты численных экспериментов.

ГОМОТЕТИЧНІ ЕЛЛІПСОІДИ, УПАКОВКА,  $\Phi$ -ФУНКЦІЇ, R-АЛГОРИТМ ШОРА, НЕЛІНІЙНА ОПТИМІЗАЦІЯ

### Введение

Несмотря на то, что задача упаковки шаров давно является предметом интенсивных теоретических и практических исследований, интерес к исследованию задачи упаковки эллипсоидов возрос лишь в последние несколько лет. Долгое время при моделировании размещаемые эллипсоиды не ограничивали контейнером. Основное внимание уделялось анализу плотности трехмерной упаковки. Оптимизационные процедуры, как правило, не использовались. Класс задач упаковки эллипсоидов имеет широкий спектр научных и практических применений. В частности, при разработке высокопрочных керамических материалов, выращивании кристаллов, моделировании структуры жидкостей, кристаллов и стекла, моделировании движения и прессования сыпучих веществ, в термодинамике при переходе жидкостей в кристаллическую форму, в робототехнике, ядерной физике, а так же в современной биологии при моделировании размещения хромосом в ядрах человеческих клеток.

Многие публикации посвящены решению данного класса задач (см., например, [1-4]).

В данной работе рассматривается оптимизационная задача упаковки заданного набора гомотетичных одинаково ориентированных эллипсоидов в контейнере (прямоугольном параллелепипеде минимального объема или эллипсоиде с минимальным коэффициентом гомотетии). Предлагаются конструктивные средства математического моделирования, учитывающие особенности задачи, и эффективные алгоритмы поиска допустимых и локально-оптимальных решений.

### 1. Постановка задачи

Имеется набор гомотетичных одинаково ориентированных эллипсоидов  $E_i$ ,  $i \in I_N = \{1, 2, \dots, N\}$ , заданных параметрами  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  в собственной системе координат  $O_i x_i z_i$ . Полагаем, что начало

собственной системы координат находится в центре его симметрии. Положение  $E_i$  в пространстве  $R^3$  определяется переменным вектором трансляции  $v_i = (x_i, y_i, z_i) \in R^3$ , где  $R^3$  – евклидово пространство.

В качестве контейнера  $\Omega$ , характеризующегося вектором переменных метрических характеристик  $p$ , рассматривается либо прямоугольный параллелепипед  $P$  переменной длины  $2A$ , ширины  $2B$  и высоты  $2C$ , т.е.  $p = (A, B, C)$ , либо эллипсоид  $E$ , заданный параметрами  $A$ ,  $B$ ,  $C$  в фиксированной системе координат  $Oxyz$  с переменным коэффициентом гомотетии  $\lambda$ , т.е.  $p = (\lambda)$ .

В зависимости от вида контейнера рассматриваются следующие функции цели:  $F = A \cdot B \cdot C$ , если  $\Omega \equiv P$ ;  $F = \lambda$ , если  $\Omega \equiv E$ .

*Задача.* Упаковать набор одинаково ориентированных гомотетичных эллипсоидов  $\{E_i(u_i), i \in I_N\}$ , в контейнер  $\Omega$  так, чтобы функция цели  $F$  достигла своего минимального значения.

### 2. Математическая модель

Основными ограничениями поставленной задачи являются:

– непересечение эллипсоидов, т.е.

$$\text{int } E_i(v_i) \cap \text{int } E_j(v_j) = \emptyset, \quad i < j \in I_N, \quad (1)$$

– включение эллипсоида в область размещения, т.е.

$$E_i(v_i) \subset \Omega \Leftrightarrow \text{int } E_i(v_i) \cap \text{int } \Omega^* = \emptyset, \quad i \in I_N, \quad (2)$$

где  $\Omega^* = R^3 \setminus \text{int } \Omega$ .

Как известно [5], конструктивным средством математического моделирования ограничений (1), (2) является метод  $\Phi$ -функций Стояна [6]. В терминах  $\Phi$ -функций ограничение (1) имеет вид  $\Phi_{ij}(v_i, v_j) \geq 0$ , где

$$\Phi_{ij}(v_i, v_j) = \frac{(x_j - x_i)^2}{(a_i + a_j)^2} + \frac{(y_j - y_i)^2}{(b_i + b_j)^2} + \frac{(z_j - z_i)^2}{(c_i + c_j)^2} - 1 \quad (3)$$

– phi-функция для эллипсоидов  $E_i(v_i)$  и  $E_j(v_j)$ , а ограничение (2) описывается неравенством  $\Phi_i(v_i) \geq 0$ , где  $\Phi_i(v_i)$  – phi-функция для эллипсоида  $E_i(v_i)$  и объекта  $\Omega^*$ . При этом: если  $\Omega \equiv P$ , то

$$\Phi_i(v_i) = \min_{k=1, \dots, 6} \chi_k(v_i), \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \chi_1(v_i) &= -x_i + A - a_i, & \chi_2(v_i) &= -y_i + B - b_i, \\ \chi_3(v_i) &= -z_i + C - c_i, & \chi_4(v_i) &= x_i + A - a_i, \\ \chi_5(v_i) &= y_i + B - b_i, & \chi_6(v_i) &= z_i + C - c_i; \end{aligned}$$

если  $\Omega \equiv E$ , то

$$\Phi_i(v_i) = 1 - \frac{(x_i)^2}{(\lambda A - a_i)^2} - \frac{(y_i)^2}{(\lambda B - b_i)^2} - \frac{(z_i)^2}{(\lambda C - c_i)^2}, \quad (5)$$

при условии, что  $E_i$  и  $E$  гомотетичны.

Математическая модель поставленной задачи может быть представлена так:

$$\min F(u), \text{ s.t. } u \in W, \quad (6)$$

$$W = \{u \in R^\sigma : \Phi_{ij}(v_i, v_j) \geq 0, \Phi_i(v_i) \geq 0, \zeta \geq 0\}, \quad (7)$$

где  $u = (p, v_1, \dots, v_N)$  – вектор переменных,  $p = (A, B, C)$ , если  $\Omega \equiv P$ ,  $p = (\lambda)$ , если  $\Omega \equiv E$ ,  $R^\sigma$  – арифметическое евклидовое пространство размерности  $\sigma$ ,  $\zeta \geq 0$  – система дополнительных ограничений на метрические характеристики контейнера  $\Omega$ .

Задача (6)-(7) является многоэкстремальной задачей нелинейного программирования, где целевая функция линейна или квадратична, а множество допустимых решений задается с использованием квадратичных функций (3), (5) и кусочно-линейных функций (4).

### 3. Методы поиска локальных экстремумов

Для поиска локальных минимумов задачи (6)-(7) используется два подхода. Первый алгоритм основан на использовании  $r$ -алгоритма Шора [7, 8]. В основе второго – метод мултистарта и оптимизационная процедура, включающая поиск допустимых стартовых точек и локальную оптимизацию, которая является развитием алгоритмов, предложенных в статьях [9-10]. В качестве локально-оптимального решения выбирается наилучший из полученных локальных экстремумов. Рассмотрим каждый из алгоритмов подробнее.

#### Алгоритм 1

Задаче оптимальной упаковки эллипсоидов в прямоугольном параллелепипеде  $\Omega \equiv P$  соответствует следующая задача нелинейного программирования:

найти

$$F^* = \min_{A, B, C, x, y, z} A \cdot B \cdot C, \quad (8)$$

при ограничениях

$$\frac{(x_i - x_j)^2}{(a_i + a_j)^2} + \frac{(y_i - y_j)^2}{(b_i + b_j)^2} + \frac{(z_i - z_j)^2}{(c_i + c_j)^2} \geq 1, \quad (9)$$

при  $1 \leq i < j \leq N$

$$-A \leq x_i - a_i, \quad x_i + a_i \leq A, \quad -B \leq y_i - b_i, \quad y_i + b_i \leq B,$$

$$-C \leq z_i - c_i, \quad z_i + c_i \leq C, \quad i = 1, \dots, N, \quad (10)$$

где  $x = (x_1, \dots, x_N)$ ,  $y = (y_1, \dots, y_N)$ ,  $z = (z_1, \dots, z_N)$ ,  $A > 0$ ,  $B > 0$ ,  $C > 0$ .

С помощью негладких штрафов задача (8)-(10) сводится к задаче безусловной минимизации негладкой функции

$$\min_{A, B, C, x, y, z} \{f(A, B, C, x, y, z) = A \cdot B \cdot C + \Phi_p(A, B, C, x, y, z)\}, \quad (11)$$

где штрафная негладкая функция  $\Phi_p(A, B, C, x, y, z)$  имеет вид

$$\begin{aligned} \Phi_p(A, B, C, x, y, z) &= P_1 F_1(x, y, z) \\ &+ P_2 F_2(A, B, C, x, y, z) \end{aligned} \quad (12)$$

Тут  $P_k$  – положительные штрафные коэффициенты,  $k = 1, 2$ , а функции  $F_1(x, y, z)$  и  $F_2(A, B, C, x, y, z)$  определяются так:

$$\begin{aligned} F_1(x, y, z) &= \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \max\{0, \\ &\frac{(x_i - x_j)^2}{(a_i + a_j)^2} - \frac{(y_i - y_j)^2}{(b_i + b_j)^2} - \frac{(z_i - z_j)^2}{(c_i + c_j)^2} + 1\} \\ F_2(A, B, C, x, y, z) &= \sum_{i=1}^N \max\{0, -x_i - A + a_i\} \\ &+ \sum_{i=1}^N \max\{0, -y_i - B + b_i\} + \sum_{i=1}^N \max\{0, -z_i - C + c_i\} \\ &+ \sum_{i=1}^N \max\{0, x_i - A + a_i\} + \sum_{i=1}^N \max\{0, y_i - B + b_i\} \\ &+ \sum_{i=1}^N \max\{0, z_i - C + c_i\}. \end{aligned}$$

Использование в (12) штрафных коэффициентов  $P_k$ ,  $k = 1, 2$ , позволяет учесть большую точность для выполнения квадратичных ограничений (9) и меньшую точность для выполнения линейных ограничений (10). Это дает возможность рационально управлять нахождением близких к предельным экстремальным точкам из множества допустимых решений в задаче (8)–(10).

Алгоритм поиска наилучшего решения задачи (8)-(10) заключается в следующем. Для заданного набора стартовых точек осуществляется поиск локальных минимумов задачи (11) с помощью модификации  $r$ -алгоритму [7]. Лучший из локальных минимумов функции  $f(A, B, C, x, y, z)$ , для которого штрафная функция  $\Phi_p(A, B, C, x, y, z)$  близка к нулю, принимается в качестве  $(A_r, B_r, C_r, x_r, y_r, z_r)$  – решения задачи (8)-(10). Ему соответствует лучшее (рекордное) значение функции цели  $F_r = A_r + B_r + C_r$  – наименьший объем контейнера, который реализуется для его длины  $A_r$ , ширины  $B_r$  и высоты  $C_r$ . Стартовые точки генерируются случайным образом в контейнере с размерами  $(A_r, B_r, C_r)$ , которые последовательно уточняются по мере нахождения лучшего локального минимума.

Задаче оптимальной упаковки эллипсоидов в эллипсоиде  $\Omega \equiv E$  соответствует следующая задача нелинейного программирования: найти

$$F^* = \min_{\lambda, x, y, z} \lambda, \quad (13)$$

при ограничениях

$$\frac{(x_i - x_j)^2}{(a_i + a_j)^2} + \frac{(y_i - y_j)^2}{(b_i + b_j)^2} + \frac{(z_i - z_j)^2}{(c_i + c_j)^2} - 1 \geq 0, \quad (14)$$

$$1 \leq i < j \leq N,$$

$$1 - \frac{(x_i)^2}{(\lambda A - a_i)^2} - \frac{(y_i)^2}{(\lambda B - b_i)^2} - \frac{(z_i)^2}{(\lambda C - c_i)^2} \geq 0, \quad (15)$$

$$i = 1, \dots, N,$$

где  $x = (x_1, \dots, x_N), y = (y_1, \dots, y_N), z = (z_1, \dots, z_N), \lambda \geq 0, A, B, C > 0$  – константы.

С помощью негладких штрафов задача (13)-(15) сводится к задаче безусловной минимизации негладкой функции

$$\min_{\lambda, x, y, z} \{f(\lambda, x, y, z) = \lambda + \Phi_P(\lambda, x, y, z)\}, \quad (16)$$

где штрафная негладкая функция  $\Phi_P(\lambda, x, y, z)$  имеет вид

$$\Phi_P(\lambda, x, y, z) = P_1 F_1(x, y, z) + P_2 F_2(\lambda, x, y, z) + P_3 F_3(\lambda) \quad (17)$$

Тут  $P_k$  – положительные штрафные коэффициенты,  $k = 1, 2, 3$  а функции  $F_1(x, y, z), F_2(\lambda, x, y, z)$  и  $F_3(\lambda)$  определяются так:

$$F_1(x, y, z) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \max\{0, \frac{(x_i - x_j)^2}{(a_i + a_j)^2} - \frac{(y_i - y_j)^2}{(b_i + b_j)^2} - \frac{(z_i - z_j)^2}{(c_i + c_j)^2} + 1\},$$

$$F_2(\lambda, x, y, z) = \sum_{i=1}^N \max\{0, \frac{(x_i)^2}{(\lambda A - a_i)^2} + \frac{(y_i)^2}{(\lambda B - b_i)^2} + \frac{(z_i)^2}{(\lambda C - c_i)^2} - 1\},$$

$$F_3(\lambda) = \max\{0, -\lambda\}.$$

Использование в (17) штрафных коэффициентов  $P_k, k = 1, 2, 3$ , позволяет учесть большую точность для выполнения квадратичных ограничений (14)-(15). Это дает возможность рационально управлять нахождением близких к предельным экстремальным точкам из множества допустимых решений в задаче (13)–(15).

Алгоритм поиска наилучшего решения задачи (14)-(15) заключается в следующем. Для заданного набора стартовых точек осуществляется поиск локальных минимумов задачи (16) с помощью модификации  $r$ -алгоритма. Лучший из локальных минимумов функции  $f(\lambda, x, y, z)$ , для которого штрафная функция к нулю, принимается в качестве – решения задачи (13)-(15). Ему соответствует лучшее (рекордное) значение функции цели  $F_r = \lambda_r$  – наименьший коэффициент гомотетии контейнера.

Стартовые точки генерируются случайным образом в контейнере с размерами  $(\lambda_r, A, \lambda_r, B, \lambda_r, C)$ , которые последовательно уточняются по мере нахождения лучшего локального минимума.

Программная реализация алгоритма выполнена на некоммерческом языке GNU Octave [8]. Программа либо находит один из локальных минимумов в задачи (14)-(15), либо сообщает о невозможности найти допустимую точку для системы ограничений (15). Ядром программы является octave-функция `ralgb5`, которая реализует  $r$ -алгоритм с постоянной величиной коэффициента растяжения пространства и адаптивным регулированием шага в направлении нормированного антисубградиента. Это регулирование направлено на увеличение точности поиска минимума функции по направлению в процессе вычислений. При этом, как правило, гарантируется, что среднее (по итерациям) число шагов не превышает двух-трех. Для минимального объема контейнера алгоритм 1 будет аналогичным.

#### Алгоритм 2

Полагаем, что стартовые размеры контейнера  $\Omega_0$  достаточно большие и гарантируют размещение эллипсоидов  $E_i$  в контейнере. Для контейнера  $\Omega \equiv P$  в качестве стартовых параметров выбираем  $A_0, B_0, C_0$ , а для  $\Omega \equiv E$  выбираем стартовое значение  $\lambda$ . При этом, не теряя общности, полагаем, что  $a_1 \geq a_2 \geq \dots \geq a_{N-1} \geq a_N$ .

Пусть коэффициенты гомотетии  $\lambda_i$  эллипсоидов  $E_i, i \in I_N$ , являются переменными. Тогда  $u = (v, \lambda) \in R^\sigma$  – вектор переменных, где  $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_N) \in R^N$ .

**Шаг 1.** Выбираем точку  $u^{(0)} = (v^0, \lambda^0)$ , где  $v_i^0 = (x_i^0, y_i^0, z_i^0) \in \Omega_0$  выбирается случайно,  $\lambda^0 = (\lambda_1^0, \dots, \lambda_N^0), \lambda_i^0 = 0, i \in I_N$ .

В качестве стартовой точки для дальнейшей оптимизации выбираем  $u^{(0)}$  и переходим к шагу 2.

**Шаг 2.** Решаем задачу

$$\max_{u \in W' \subset R^\sigma} \sum_{i=1}^N a_i \lambda_i, \quad (18)$$

$$W' = \{u \in R^\sigma : \Phi_{ij}(u) \geq 0, \Phi_i(u) \geq 0,$$

$$0 \leq \lambda_i \leq 1, j > i, i \in I_N\}. \quad (19)$$

В результате решения задачи (18)-(19) получаем точку глобального максимума  $u^{(2)} = (v^{(2)}, \lambda^{(2)})$ .

В качестве стартовой точки для дальнейшей оптимизации выбираем  $u^{(2)}$  и переходим к шагу 3.

**Шаг 3.** Решаем задачу (6)-(7). В результате решения получаем точку локального минимума  $u^{(3)} = (p^{(3)}, v^{(3)})$ .

**Шаг 4.** В качестве стартовой точки для дальнейшей оптимизации выбираем точку  $u^{(3)} = (v^{(3)}, \lambda^{(3)})$  при фиксированных размерах контейнера. Решаем вспомогательную задачу вида

$$\max_{u \in W'' \subset R^\sigma} \sum_{i=1}^N (a_i \lambda_i)^2, \quad (20)$$

$$W'' = \{u \in R^\sigma : \Phi_{ij}(u) \geq 0, \Phi_i(u) \geq 0, \\ a^- \leq a_i \lambda_i \leq a^+, i < j = 1, \dots, N\}, \quad (21) \\ a^- = \min\{a_i, i \in I_N\}, \quad a^+ = \max\{a_i, i \in I_N\}.$$

В результате решения задачи (20)-(21) получаем точку локального максимума  $u^{0(4)} = (v^{0(4)}, \lambda^{0(4)})$ .

**Шаг 5.** Ранжируем по убыванию  $\tilde{a}_i = \lambda_i^{0(4)} a_i$ ,  $i \in I_N$ . Формируем последовательность

$$(i_1, i_2, \dots, i_{N-1}, i_N),$$

такую, что  $\tilde{a}_{i_1} \geq \tilde{a}_{i_2} \geq \dots \geq \tilde{a}_{i_{N-1}} \geq \tilde{a}_{i_N}$ .

Осуществляем сравнение  $a_i$  и  $\tilde{a}_{i_j}$ : если  $\lambda_i^{0(4)} \geq 1$ , то полагаем  $\lambda_{i_j}^{0(5)} = 1$ , если  $\lambda_i^{0(4)} < 1$ , то полагаем  $\lambda_{i_j}^{0(5)} = \lambda_i^{0(4)}$ . Формируем точку  $u^{0(5)} = (v^{0(5)}, \lambda^{0(5)})$  и переходим к следующему шагу.

**Шаг 6.** Стартуя из точки  $u^{0(5)} = (v^{0(5)}, \lambda^{0(5)})$ , решаем задачу (18)-(19). В результате решения получаем точку глобального максимума  $u^{0(6)} = (v^{0(6)}, \theta^{0(6)}, \lambda^{0(6)})$ . В противном случае переходим к шагу 1.

Стартуя из точки  $u^{0(6)}$ , решаем задачу (6)-(7) и получаем точку локального минимума  $u^{r(6)} = (p^{r(6)}, v^{r(6)})$ .

**Шаг 7.** Генерируем случайно точку  $q_1$ . Если  $q_1 \notin E_i, i \in I_N, q_1 \in \Omega$ , то в качестве параметров размещения дополнительного эллипсоида с полуосями  $a_{q_1} = a_1, b_{q_1} = b_1, A_{q_1} = A$  и коэффициентом гомотетии  $\lambda_{q_1}^0 = \varepsilon$  выбираем точку  $q_1$ .

Стартуя из точки  $u^{0(7)} = (v^{r(6)}, v_{q_1}^0, \lambda_{q_1}^0)$  при фиксированных размерах контейнера решаем следующую вспомогательную задачу:

$$\max_{u \in W \subset R^\sigma} a_{q_1} \lambda_{q_1}, \quad (22)$$

$$W_\lambda = \{u \in R^\sigma : \chi(u) \geq 0, 0 \leq \lambda_{q_1} \leq 1\}, \quad (23)$$

где  $u = (v, v_{q_1}, \lambda_{q_1}) \in R^\sigma, v = (v_1, \dots, v_N)$ ,

$$\chi(u) = \min\{\Phi_\tau(u), \Phi_l(u), \tau = 1, \dots, m, l \in I_N\}, \\ m = 0.5 \cdot N \cdot (N + 1).$$

В результате решения задачи (22)-(23) получаем точку локального максимума

$$u^{0(7)} = (v^{0(7)}, v_{q_1}^{0(7)}, \lambda_{q_1}^{0(7)}).$$

Осуществляем поиск  $a_j \leq \lambda_{q_1} a_{q_1}, b_j \leq \lambda_{q_1} b_{q_1}, j \in I_N$ . Если такой эллипсоид  $E_j$  существует, то принимаем  $v_j = v_{q_1}$  по аналогии с алгоритмом, предложенным в работе [9].

Формируем точку:  $u^{r(7)} = (p^{r(6)}, v^{r(7)})$ . Стартуя из точки  $u^{r(7)} = (p^{r(6)}, v^{r(7)})$ , решаем задачу (6)-(7). Получаем точку локального минимума  $u^{r(7)} = (p^{r(7)}, v^{r(7)})$ , причем  $u^* = u^{r(7)} = (p^*, v^*, \theta^*)$ .

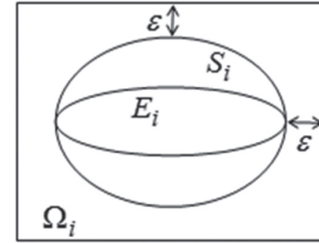
С целью минимизации числа нелинейных неравенств, формирующих область допустимых решений в задачах нелинейного программирования вида (6)-(7), предлагается алгоритм, который

позволяет значительно сократить вычислительные ресурсы (время и память).

*Алгоритм локальной оптимизации с преобразованием области допустимых решений (LOFRT)*

В основе алгоритма лежит оптимизационная процедура LOFRT, предложенная в [10] для задачи оптимального размещения эллипсов и состоит в следующем.

Пусть  $u^{(0)} \in W$  – допустимая точка. Около каждого эллипсоида  $E_i$  описывается сфера  $S_i$  радиуса  $a_i, i \in I_N$ . Для каждой сферы  $S_i$  строится «индивидуальный» кубический контейнер  $\Omega_i \supset S_i \supset E_i$ , длина стороны которого равна  $2 \cdot (a_i + \varepsilon), i \in I_N$ . При этом  $S_i, E_i$  и  $\Omega_i$  имеют один и тот же центр  $(x_i^0, y_i^0, z_i^0)$ , а стороны  $\Omega_i$  параллельны соответствующим сторонам  $\Omega$  (рис. 1). Выбирается  $\varepsilon = \sum_{i=1}^N b_i / N$ . Далее фиксируется положение каждого индивидуального контейнера  $\Omega_i$ . Таким образом, эллипсоид  $E_i$  может размещаться только внутри индивидуального контейнера  $\Omega_i$ .



**Рис. 1.** Формирование индивидуального контейнера

Далее определяется система дополнительных ограничений на вектор трансляции  $v_i$  для каждого эллипсоида  $E_i$  в виде  $\Phi^{S_i \Omega_i^*} \geq 0, i \in I_N$ , где

$$\Phi^{S_i \Omega_i^*} = \min\{-x_i + x_i^0 + \varepsilon, -y_i + y_i^0 + \varepsilon, -z_i + z_i^0 + \varepsilon,$$

$$x_i - x_i^0 + \varepsilon, y_i - y_i^0 + \varepsilon, z_i - z_i^0 + \varepsilon\}$$

– phi-функция для  $s_i$  и  $\Omega_i^* = R^3 \setminus \text{int} \Omega_i$ .

Заметим, что неравенство  $\Phi^{S_i \Omega_i^*} \geq 0$  эквивалентно системе линейных неравенств  $-x_i + x_i^0 + \varepsilon \geq 0, -y_i + y_i^0 + \varepsilon \geq 0, -z_i + z_i^0 + \varepsilon, x_i - x_i^0 + \varepsilon \geq 0, y_i - y_i^0 + \varepsilon \geq 0, z_i - z_i^0 + \varepsilon$ .

Очевидно, что если контейнеры  $\Omega_i$  и  $\Omega_j$  не имеют общих внутренних точек, т.е.  $\Phi^{\Omega_i \Omega_j} \geq 0$ , тогда не следует накладывать ограничение на пересечение эллипсоидов  $E_i$  и  $E_j$ . Например, для эллипсоидов  $E_1$  и  $E_7, E_4$  и  $E_8, E_1$  и  $E_8$  (рис. 2).

Далее формируется область допустимых решений

$$W_1 = \{u \in R^\sigma : \Phi_{ij} \geq 0, (i, j) \in \Xi_1, \Phi_i \geq 0, i \in \Xi_2,$$

$$\Phi^{S_i \Omega_i^*} \geq 0, i \in I_N, l \geq l^0 - \varepsilon, w \geq w^0 - \varepsilon, h \geq h^0 - \varepsilon\},$$

$$\Xi_1 = \{(i, j) : \Phi^{\Omega_i \Omega_j} < 0\}, \quad \Xi_2 = \{i : \Phi^{\Omega_i \Omega_i} < 0\}.$$

Другими словами, из системы, которая описывает область  $W$ , исключаем phi-неравенства для тех пар эллипсоидов, у которых индивидуальные



контейнеры не пересекаются. При этом добавляем вспомогательные неравенства  $\Phi^{S_i, \Omega_i^*} \geq 0$ , описывающие условие включения  $S_i$  в соответствующий индивидуальный контейнер  $\Omega_i$ ,  $i \in I_N$ .

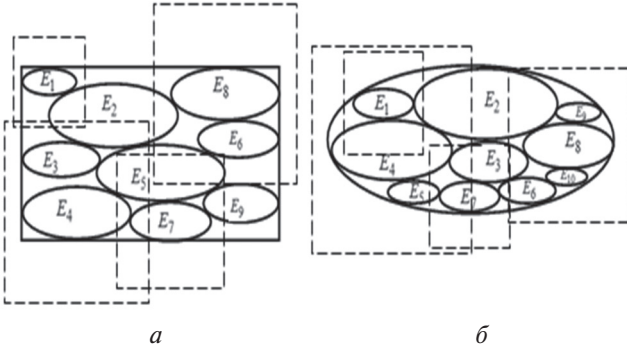


Рис. 2. Размещение эллипсоидов  $E_i$  и их индивидуальных контейнеров  $\Omega_i$ :  $a$  – для  $\Omega \equiv P$ ,  $b$  –  $\Omega \equiv E$

Затем осуществляем поиск точки локального минимума для задачи вида

$$\min_{u_{w_1} \in W_1 \subset R^\sigma} F(u_{w_1}).$$

Точка  $u_{w_1}^*$  является стартовой точкой  $u^{(1)}$  на второй итерации оптимизационной процедуры. На данном этапе вновь определяются все пары эллипсоидов с непересекающимися индивидуальными контейнерами, формируется соответствующая подобласть  $W_2$  (аналогично  $W_1$ ) и вычисляется точка локального минимума  $u_{w_2}^* \in W_2$ , которая используется в качестве стартовой точки  $u^{(2)}$  на третьей итерации и т.д.

В общем случае, на  $k$ -том шаге, стартуя из точки  $u^{(k-1)}$ , решается задача вида

$$\min_{u_{w_k} \in W_k \subset R^\sigma} F(u_{w_k}), \quad (24)$$

$$W_k = \{u \in R^\sigma : \Phi_{ij}^k \geq 0, (i, j) \in \Xi_{k1}, \Phi_i^k \geq 0, i \in \Xi_{k2},$$

$$\Phi^{S_i, \Omega_i^*} \geq 0, i \in I_N, l \geq l_{w_k}^* - \varepsilon, w \geq w_{w_k}^* - \varepsilon, h \geq h_{w_k}^* - \varepsilon\},$$

$$\Xi_{k1} = \{(i, j) : \Phi^{\Omega_{ki}, \Omega_{kj}} < 0, i > j \in I_N\},$$

$$\Xi_{k2} = \{i : \Phi^{\Omega_{ki}, \Omega_i^*} < 0, i \in I_N\}. \quad (25)$$

Итерационная процедура заканчивается, когда  $F(u_{w_k}^*) = F(u_{w_{k+1}}^*)$ .

Точка  $u^* = u^{(k)*} = u_{w_k}^* \in R^\sigma$  является точкой локального минимума задачи (6)-(7), где точка  $u_{w_k}^* \in R^\sigma$  является точкой локального минимума на последней итерации.

Таким образом, для  $O(n^2)$  пар эллипсоидов в контейнере, LOFRT процедура позволяет осуществлять проверку phi-функций, в общем случае, только для  $O(n)$  пар эллипсоидов (это зависит от размеров эллипсоидов и величины  $\varepsilon$ ).

Параметр  $\varepsilon$  обеспечивает баланс между количеством неравенств в каждой подзадаче нелинейного программирования (24)-(25) и числом подзадач, которые необходимо решить для поиска локально-оптимального решения задачи (6)-(7).

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет свести задачу (6)-(7) с количеством неравенств  $O(n^2)$  к последовательности задач с количеством неравенств  $O(n)$ . Это приводит к значительному сокращению вычислительных ресурсов при решении задач нелинейного программирования.

#### 4. Алгоритм задачи доупаковки

Суть задачи доупаковки состоит в следующем. В результате решения оптимизационной задачи упаковки заданного набора  $E_i, i \in I_N$ , эллипсоидов одним из предложенных выше алгоритмов, получаем локально оптимальное решение с соответствующим размещением эллипсоидов  $E_i(u_i^*)$ ,  $i \in I_N$ , в контейнере  $\Omega'$ .

**Задача доупаковки.** Необходимо заполнить свободное пространство внутри контейнера,  $\Omega' \setminus \bigcup_{i=1}^N E_i(u_i^*)$ , дополнительным набором непересекающихся гомотетических эллипсоидов заданных размеров. Задача доупаковки может решаться, как с целью разместить заданное число  $n$  дополнительных эллипсоидов, так и с целью доупаковать максимально возможное число эллипсоидов из заданного набора.

Алгоритм задачи доупаковки состоит из нескольких этапов.

1) Генерируем множество  $\zeta$  произвольных точек  $r_j = (x_j, y_j, z_j)$ , таких что:  $r_j \in \Omega'$ ,  $r_j \notin E_i$ ,  $j = 1, \dots, \zeta$ ,  $i \in I_N$ .

2) Решаем вспомогательную задачу нелинейной оптимизации, стартуя из каждой точки  $r_j$ :

$$\max_{u_r \in W \subset R^\sigma} \lambda_r, \quad (26)$$

$$W_\lambda = \{u_r \in R^\sigma : \Phi_i^E(u_r) \geq 0, \Phi_i^*(u_r) \geq 0,$$

$$\frac{a_1}{a_N} \leq \lambda_r \leq 1, i = 1, \dots, m\} \quad (27)$$

где  $u_r = (v_r, \lambda_r)$ ,  $v_r = (x_r, y_r, z_r)$ ,  $\lambda_r$  – коэффициент гомотетии добавляемого эллипсоида,  $a_1$  и  $a_N$  – размеры больших полуосей наименьшего и наибольшего из заданных эллипсоидов,  $\Phi_i^E(u_r) \geq 0$  – условие непересечения с упакованными эллипсоидами,  $\Phi_i^*(u_r) \geq 0$  – условие включения эллипсоида в контейнер  $\Omega' \setminus \bigcup_{i=1}^m E_i(u_i^*)$ ,  $m$  – общее количество упакованных и доупакованных на текущей итерации алгоритма доупаковки эллипсоидов.

В результате решения задачи (26)-(27) получаем множество точек локального максимума  $u_r^{*j}$ ,  $j = 1, \dots, \zeta$ .

3) Выбираем такую точку  $u_r^*$  из набора  $u_r^{*j}$ , которой соответствует  $\lambda^* = \max \lambda_r^{*j}$ .

4) Из набора эллипсоидов  $\{E_i\}$  выбираем «наибольший» эллипсоид  $E_r$ , для которого выполняется условие  $a_j \geq a_N \lambda^*$  и размещаем эллипсоид  $E_r$  с центром в точке  $v_r^*$ .

5) Для доупаковки  $n$  эллипсоидов повторяем этапы 1)-4)  $n$  раз; для доупаковки максимального количества эллипсоидов повторяем этапы 1)-4) до тех пор, пока выполняется условие  $\frac{a_1}{a_N} \leq \lambda_r$ .

Использование алгоритма доупаковки позволяет повысить коэффициент заполнения контейнера.

### 5. Численные эксперименты

Чтобы продемонстрировать эффективность предлагаемых методов приведем результаты численных экспериментов. Эксперименты проводились на компьютере Intel(R) Core(TM) i7-3630QM. Для поиска локальных минимумов использовался солвер FindArgMin пакета Wolfram Mathematica 9. Во всех примерах осуществляется поиск 10 локальных минимумов.

В первых двух примерах рассматривается  $N=20$  эллипсоидов, имеющих следующие размеры:  $(a_1, b_1, c_1) = (30, 10, 10)$ ,  $(a_2, b_2, c_2) = (9, 3, 3)$ ,  $(a_3, b_3, c_3) = (7.5, 2.5, 2.5)$ ,  $\{(a_i, b_i, c_i) = (6, 2, 2), i = 4, \dots, 11\}$ ,  $\{(a_i, b_i, c_i) = (3, 1, 1), i = 12, \dots, 20\}$ .

*Пример 1.* Размещение эллипсоидов  $N=20$  в контейнере-параллелепипеде, соответствующее точке локального минимума  $u^*$ . Контейнер имеет объем  $V^* = 8 \cdot F(u^*)$ ,  $F(u^*) = 3213.92$  при  $A^* = 30$ ,  $B^* = 10.713$ ,  $C^* = 10$ .

*Пример 2.* Размещение  $N=20$  эллипсоидов в контейнере-эллипсоиде, соответствующее точке локального минимума  $u^*$ . Контейнер имеет коэффициент гомотетии  $\lambda^* = F(u^*) = 0,32099$  при стартовых размерах контейнера (эллипсоида)  $A = 121.5$ ,  $B = 40.5$ ,  $C = 40.5$ .

Далее рассматривается упаковка  $N=50$  эллипсоидов, имеющих следующие размеры:

$$(a_1, b_1, c_1) = (60, 20, 20), (a_2, b_2, c_2) = (30, 10, 10),$$

$$(a_3, b_3, c_3) = (18, 6, 6), \{(a_i, b_i, c_i) = (10.5, 3.5, 3.5),$$

$$i = 4, \dots, 8\}, \{(a_i, b_i, c_i) = (9, 3, 3), i = 8, \dots, 13\},$$

$$\{(a_i, b_i, c_i) = (8.25, 2.75, 2.75), i = 14, \dots, 17\},$$

$$\{(a_i, b_i, c_i) = (7.5, 2.5, 2.5), i = 18, \dots, 24\}, \{(a_i, b_i, c_i) =$$

$$(6, 2, 2), i = 25, \dots, 40\}, \{(a_i, b_i, c_i) = (3, 1, 1), i = 41, \dots, 50\}.$$

*Пример 3.* Размещение  $N=50$  эллипсоидов в контейнере  $\Omega \equiv P$ , соответствующее точке локального минимума  $u^*$ . Контейнер имеет объем  $V^* = 8 \cdot F(u^*)$ ,  $F(u^*) = 33\,874.5$  при  $A^* = 84.686$ ,  $B^* = 20$ ,  $C^* = 20$ .

Использование LOFRT процедуры позволило значительно сократить время решения задачи. В частности, для примера 3 время решения без использования алгоритма – 13 часов, с его применением – 5 часов).

*Пример 4.* Размещение  $N=50$  эллипсоидов в контейнере-эллипсоиде, соответствующее точке локального минимума  $u^*$ . Коэффициент гомотетии

контейнера имеет значение  $\lambda^* = F(u^*) = 0,45775$  при стартовых размерах контейнера (эллипсоида)  $A = 160$ ,  $B = 55$ ,  $C = 55$ .

*Пример 5.* Рассматривается упаковка  $N=50$  эллипсоидов, имеющих следующие размеры:

$$\{(a_i, b_i, c_i) = (30, 10, 10), i = 1, 2\},$$

$$(a_3, b_3, c_3) = (18, 6, 6), \{(a_i, b_i, c_i) = (10.5, 3.5, 3.5),$$

$$i = 4, \dots, 8\}, \{(a_i, b_i, c_i) = (9, 3, 3), i = 8, \dots, 13\},$$

$$\{(a_i, b_i, c_i) = (8.25, 2.75, 2.75), i = 14, \dots, 17\},$$

$$\{(a_i, b_i, c_i) = (7.5, 2.5, 2.5), i = 18, \dots, 24\},$$

$$\{(a_i, b_i, c_i) = (6, 2, 2), i = 25, \dots, 40\},$$

$$\{(a_i, b_i, c_i) = (3, 1, 1), i = 41, \dots, 50\}$$

Размещение  $N=50$  эллипсоидов в  $\Omega \equiv P$ , соответствующее точке локального минимума  $u^*$ . Контейнер имеет объем  $V^* = 8 \cdot F(u^*)$ ,  $F(u^*) = 8030.25$  при  $A^* = 80.3025$ ,  $B^* = 10$ ,  $C^* = 10$ .

Использование алгоритма LOFRT позволило уменьшить время решения задачи для примера 5 на 10 часов (время решения без использования алгоритма – 18 часов, с его применением – 8 часов).

*Пример 6.* Рассматривается упаковка  $N=75$  гомотетичных одинаково ориентированных эллипсоидов, имеющих следующие размеры:

$$\{(a_i, b_i, c_i) = (10.5, 3.5, 3.5), i = 1, \dots, 15\},$$

$$\{(a_i, b_i, c_i) = (9, 3, 3), i = 16, \dots, 30\}, \{(a_i, b_i, c_i) =$$

$$(7.5, 2.5, 2.5), i = 31, \dots, 45\}, \{(a_i, b_i, c_i) = (6, 2, 2),$$

$$i = 46, \dots, 60\}, \{(a_i, b_i, c_i) = (3, 1, 1), i = 61, \dots, 75\}.$$

Контейнер имеет объем

$$V^* = 8 \cdot F(u^*), F(u^*) = 4825,16$$

при  $A^* = 219.917$ ,  $B^* = 3.5$ ,  $C^* = 6.29$ .

*Пример 7.* Задача доупаковки максимально возможного числа эллипсоидов из заданного набора для Примера 3. Всего удалось доупаковать 590 эллипсоидов. Допустимое размещение эллипсоидов приведено на рис. 3. Значение функции цели, полученное в результате решения задачи совпадает со значением функции цели, полученным в Примере 3.

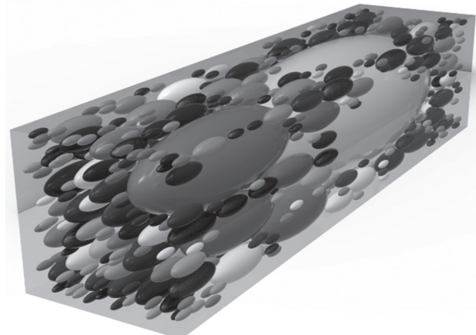


Рис. 3. Допустимое размещение 640 эллипсоидов для Примера 7

### Выводы

Рассматриваются две задачи оптимальной упаковки гомотетичных одинаково ориентированных эллипсоидов в виде задач нелинейного программирования. Предложены два метода поиска локально-оптимальных упаковок в прямоугольном параллелепипеде минимального объема и контейнере, имеющем форму эллипсоида, с минимальным коэффициентом гомотетии. Первый метод основан на  $r$ -алгоритме Шора. Второй метод использует мультистарт, гомотетические преобразования эллипсоидов и специальную оптимизационную процедуру. Данная процедура сводит задачу нелинейного программирования с большим числом неравенств к последовательности задач нелинейного программирования с меньшим числом неравенств, что значительно сокращает вычислительные ресурсы. Предлагается алгоритм, позволяющий осуществлять «доупаковку» максимально возможного числа эллипсоидов из заданного набора. С использованием предложенных в работе методов можно получить локально-оптимальные и допустимые решения задачи упаковки эллипсоидов в контейнере, имеющем форму прямоугольного параллелепипеда или эллипсоида.

Эффективность предложенных алгоритмов подтверждается результатами численных экспериментов.

Предложенные в работе методы могут быть использованы для построения стартовых точек из области допустимых решений в задаче поиска оптимальных упаковок гомотетичных эллипсоидов, допускающих непрерывные вращения [11].

### Список литературы:

1. Uhler C., Wright S. J. Packing Ellipsoids with Overlap // SIAM Review, 55(4):671-706. 2013.
2. Kallrath J. Packing ellipsoids into volume-minimizing rectangular boxes // Journal of Global Optimization. DOI:10.1007/s10898-015-0348-6. 3.
3. Choi Y. K. Continuous collision detection for ellipsoids / Y. K. Choi, J. W. Chang, W. Wang, M. S. Kim, and G. Elber // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 15(2):311-324, 2009.
4. Lubachevsky B. D., Stillinger F. H. Geometric properties of random disk packings // Journal of Statistical Physics, 60(5-6):561-583. 1990.
5. Bennell J.A., Oliveira J.F. A tutorial in irregular shape packing problem // Journal of the Operational Research Society. 2009. 60:93-105.
6. Chernov N., Stoyan Yu., Romanova T. Mathematical model and efficient algorithms for object packing problem // Computational Geometry: Theory and Applications. 2010. Vol. 43, № 5. P. 533-553.
7. Шор Н.З., Стецюк П.И. Использование модификации  $r$ -алгоритма для нахождения глобального минимума полиномиальных функций // Кибернетика и системный анализ. — 1997. — № 4. — С. 28-49.
8. Octave [Электронный ресурс]: <http://www.octave.org>. — Режим доступа: свободный.
9. Стецюк П.И., Романова Т.Є., Субота І.О. NLP-задача упаковки гомотетичних еліпсоїдів у прямокутний контейнер // Теорія оптимальних рішень: зб. наук. пр. — Київ: Ін. кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України. 2014. С. 139-146.
10. Stoyan Y, Pankratov A, Romanova T. Quasi-phi-functions and optimal packing of ellipses. Journal of Global Optimization. 2015. DOI:10.1007/s10898-015-0331-2.
11. Pankratov A., Romanova T., Khlud O. Quasi-phi-functions in packing of ellipsoids. Radioelectronics & Informatics, 68:37-42. 2015.

Поступила в редколлегию 7.04.2017

УДК 519-161



**А.В. Панишев<sup>1</sup>, В.Л. Левковский<sup>2</sup>, Г.В. Марчук<sup>3</sup>**  
<sup>1</sup> ЖГТУ, г. Житомир, Украина, pzs.ztu@gmail.com  
<sup>2</sup> ЖГТУ, г. Житомир, Украина, levkivskyy@ztu.edu.ua  
<sup>3</sup> ЖГТУ, г. Житомир, Украина, mgv.555.mgv@gmail.com

## ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ПРИБЛИЖЕННЫХ АЛГОРИТМАХ РЕШЕНИЯ СИММЕТРИЧНОЙ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЁРА (СЗК)

В статье приведено описание алгоритма нахождения гамильтонова цикла по *i*-дереву симметричной задачи коммивояжера. Алгоритм строит приближенное решение метрической задачи коммивояжера с оценкой погрешности меньшей, чем у большинства приближенных алгоритмах. Полученная оценка для данного алгоритма является не улучшаемой. По быстродействию предложенный алгоритм превосходит все известные алгоритмы метрической задачи коммивояжера.

СИММЕТРИЧНАЯ ЗАДАЧА КОММИВОЯЖЕРА (СЗК), I-ДЕРЕВО, ПРИБЛИЖЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ, ГРАФ, ГАМИЛЬТОНОВ ЦИКЛ

### Введение

Одна из самых известных задач комбинаторной оптимизации — это задача коммивояжера (англ. Travelling salesman problem). Задача коммивояжера (ЗК) состоит в том, чтобы найти кратчайший маршрут, проходящий через каждый город точно один раз, при заданных расстояниях между двумя городами [1].

ЗК является так называемой NP-трудной задачей, и при большом количестве вершин графа, точное решение может быть получено только за экспоненциальное время и решать ее переборными алгоритмами будет неэффективно.

В статье будет рассмотрен один из этапов построения приближенного решения СЗК, алгоритм нахождения гамильтонова цикла в *i*-дереве  $T = (V, E_i)$  полного графа  $H_n = (V, E_n)$  с невысокой погрешностью.

### 1. Постановка задачи

Суть задачи коммивояжера сводится к нахождению гамильтонова цикла минимальной стоимости. Частным случаем постановки задачи коммивояжера есть симметрическая задача коммивояжера (СЗК), это задача с симметричной матрицей весов, которая моделируется неориентированным графом.

Входными данными является *i*-дерево  $T = (V, E_i)$  полного графа  $H_n = (V, E_n)$ .

Выходными данными является гамильтонов цикл полученный с помощью алгоритма преобразования *i*-дерево  $T$ .

### 2. Преобразование *i*-дерева в гамильтонов цикл

В СЗК для матрицы стоимостей  $[d_{ij}]_n$ , в которой  $d_{ij} = d_{ji}$ ,  $i \neq j$ ,  $d_{ij} \geq 0$ ,  $d_{ii} = \infty$  и  $i, j = \overline{1, n}$ , минимизируемый функционал определяется по формуле

$$D(\tau) = \sum_{i=1}^n d_{\tau[i]}, \quad (1)$$

где  $\tau = (\tau[1], \tau[2], \dots, \tau[n])$  — циклическая перестановка или обход, которому соответствует маршрут коммивояжера  $\tau = (\tau[1], \tau[2], \dots, \tau[n], \tau[1])$ , а величину  $D(\tau)$  называют стоимостью обхода [2].

Матрице  $[d_{ij}]_n$  отвечает полный взвешенный граф

$$H_n = (V, E_n), |V| = n, |E_n| = C_n^2,$$

где ребру  $(i, j)$  приписан вес  $d_{ij} = d_{ji}$ . Допустимым решением СЗК является гамильтонов цикл, стоимость которого определяется из матрицы  $[d_{ij}]_n$  и выражения (1).

В СЗК число всех допустимых решений равно  $(1/2)(n-1)!$ .

Быстродействие и точность приближенных методов решения СЗК заданной размерности  $n$  зависит от свойств матрицы стоимостей  $[d_{ij}]_n$  и значений ее элементов. Для  $[d_{ij}]_n$  число значений  $d_{ij}$  будет не больше  $n(n-1)/2$ , если же значения  $d_{ij}$  принадлежат промежутку  $[a, b]$ , то в случае выполнения неравенства

$$\frac{n(n-1)}{2} > b - a + 1$$

матрица  $[d_{ij}]_n$  содержит несколько элементов одинакового веса, то есть  $i < j$ .

Решение СЗК точными методами не представляется возможными. Нахождение минимального обхода в СЗК гарантируют, как известно переборные методы, но применение, например алгоритма ветвей и границ, приводит к быстрому росту числа вершин дерева ветвлений и неэффективной работе правил отсева из-за большого количества числа оценок, принимающих близкие значения. Единственной альтернативой точным методам являются приближенные алгоритмы решений.

Работоспособность приближенных алгоритмов комбинаторной оптимизации характеризуется двумя противоречивыми показателями: точностью и временем решения, полиномиально зависящих от размера входных данных задачи. При рассмотрении матриц стоимостей фиксированного размера



СЗК наблюдается характерная для приближенных алгоритмов тенденция роста времени и погрешности решения с увеличением числа близких значений  $d_{ij}$ .

Рассмотрим СЗК, где матрица стоимостей  $d_{ij}$  содержит достаточно большое число равных или близких друг к другу значений, образуя широкую область поиска в окрестностях оптимума (1). Рассматривая работу приближенных алгоритмов с подобными условиями СЗК можно заметить тенденцию уменьшения быстродействия работы алгоритмов.

Основная идея предлагаемого метода состоит в построении  $i$ -дерева, обобщающего понятие 1-дерева [2].

Под  $i$ -деревом  $T=(V, E_i)$  будем понимать подграф полного графа,  $H_n=(V, E_n)$  который содержит дерево, стягивающее множество вершин  $V \setminus \{i\}$ , и два ребра, инцидентные вершине  $i, i \in \{1, 2, \dots, n\}, |V|=n$ . Рассмотрим работу алгоритма, который использует  $i$ -дерево для уменьшения погрешности приближенных алгоритмов СЗК.

В  $i$ -дереве  $T$  обозначим  $\delta_k, k=\overline{1, n}$ , степень вершины  $k$ . Множество вершин  $V$  дерева представим разбиением на три подмножества  $V_1, V_2, V_3$ , где  $V_1$  – множество вершин с единичной степенью (конечных или висячих вершин),  $V_2$  – множество вершин со степенью 2, а  $V_3 = V \setminus (V_1 \cup V_2)$ .

При построении алгоритма будем использовать Лемму [1], где для любого  $i$ -дерева графа  $H_n=(V, E_n), |V|=n, i \in \{1, 2, \dots, n\}, n \geq 3$  справедливо равенство [1]:

$$|V_1| = \sum_{k=1}^n \max\{\delta_k - 2, 0\} \quad (2)$$

В  $i$ -дереве графа  $H_n=(V, E_n)$ , представленном гамильтоновым циклом,  $V=V_2$ . По определению любое  $i$ -дерево содержит один цикл, отсюда следует, что  $V_2 \neq \emptyset$ . Связный граф  $T=(V, E_n), |V|=|E_n|$ , в котором число вершин степени 2 меньше  $n$ , не является гамильтоновым циклом. Кроме того, из (2) следует, что если в  $i$ -дереве  $T V_3 \neq \emptyset$ , то и  $V_1 \neq \emptyset$ . Заметим, что для любого  $i$ -дерева графа  $H_n=(V, E_n)$  выполняется условие  $1 \leq |V_1| \leq |V| - 3$ .

По теореме 2.1 [1] подграф полного графа  $H_n=(V, E_n)$  представленный  $i$ -деревом  $T=(V, E_i), |V|=|E_i|=n, i \in \{1, 2, \dots, n\}$ , корректно преобразуется в гамильтонов цикл за время  $O(n|V_i|)$ , где  $|V_i|$  - число висячих вершин в  $T$ .

$i$ -дерево  $T$  полного графа  $H_n=(V, E_n)$  преобразуется в гамильтонов цикл в результате следующих действий:

*S0.* По  $i$ -дереву  $T=(V, E_i), |E_i|=n$ , построить матрицу смежности. Взять  $i$  как начальную вершину и проделать проход по  $i$ -дереву по левой цепи или правой цепи, изменяя  $\delta_k$ . В результате построить матрицу смежности, в которых  $\delta_i = \delta_k = 2$ .

Определить  $k$  как текущую вершину,  $k = i$ .

*S1.* Пока  $V_1 > 0$  выполнять начало

*S2.* Пока  $\delta_k = 2$  выполнять начало

запомнить текущую вершину как пройденную,  $l = k$ ;

определить  $k$  как следующую вершину, смежную с пройденной

конец;

удалить из матрицы смежности ребро  $(l, k)$  и соответственно  $(k, l)$ ;

взять любую вершину  $f$  из  $V_1$ ;

из  $V_1$  удалить  $f$ ;

добавить в матрицу смежности ребро  $(l, f)$  и соответственно  $(f, l)$ ;

определить  $k$  как следующую вершину  $k = f$ ;

конец

На шаге *S0* определяем вершину, которая будет начальной и направление прохождения по матрице смежности: по правой или левой цепи. В цикле *S1* удаляется ребро  $(l, k)$ , соответственно степень вершины уменьшается на единицу  $\delta_k = \delta_k - 1$ , если  $\delta_k > 2$ , и добавляем новое ребро  $(l, f)$ , где  $f$ , висячая вершина, соответственно степень вершины увеличивается на единицу  $\delta_k = \delta_k + 1$ , при этом из массива висячих вершин удаляем вершину  $f$ .

**Пример.** Преобразуем 10-дерево  $T=(V, E_{10})$  полного графа  $H_{11}=(V, E_{11})$  рис. 1, в гамильтонов цикл.

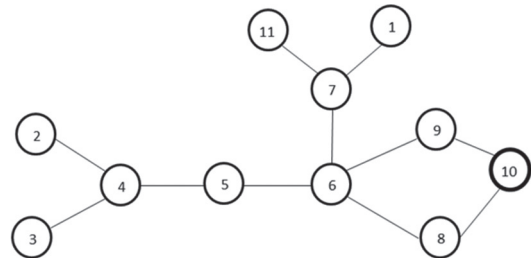


Рис.1. 10-дерево  $T=(V, E_{10})$  полного графа  $H_{11}$

Входная матрица смежности 10-дерево  $T=(V, E_{10})$  полного графа  $H_{11}$  изображена на рис. 2.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2	0	-	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	-	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	1	-	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	-	1	1	1	0	0
7	1	0	0	0	0	1	-	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	1	0	-	0	1	0
9	0	0	0	0	0	1	0	0	-	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-	0
11	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-

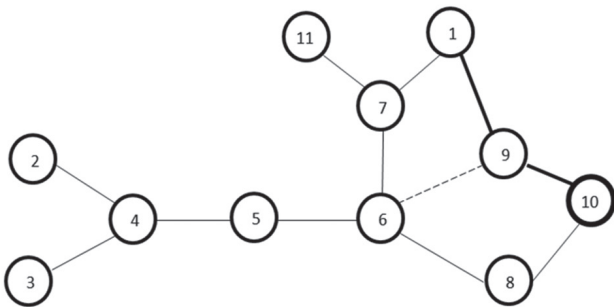
Рис. 2. Матрица смежности 10-дерево  $T$

Перед началом работы определим массив висячих вершин  $V_1 = \{1, 2, 3, 11\}$ , начальную вершину  $k = 10$ , обход матрицы начинаем справа. Так как  $\delta_{10} = 2$  запоминаем текущую вершину  $l = k = 10$  и выбираем следующую вершину  $k = 9$ . Цикл повторяется до тех пор, пока  $\delta_k = 2$ .

При  $k = 6, \delta_6 = 4, l = 9$ , удаляем ребро  $(6, 9)$  и соответственно  $(9, 6)$  из матрицы смежности рис. 3 а), ребро изображено пунктирной линией на рис. 3 б).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
2	0	-	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	-	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	1	-	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	-	1	1	0	0	0
7	1	0	0	0	0	1	-	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	1	0	-	0	1	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	-	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-	0
11	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-

а



б

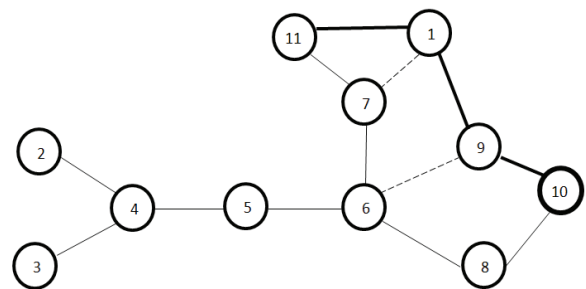
Рис. 3. а — Матрица смежности после выполненных операций, б — Граф, построенный после выполненных операций

Из массива висячих вершин выбираем любую вершину  $f$ , например  $f = 1$  и добавляем ребро  $(9, 1)$  и соответственно  $(1, 9)$  в матрицу смежности рис. 4, а, на рис. 4, б, ребро изображено жирной линией, при этом степень текущей вершины уменьшается на 1 и  $\delta_6 = 3$ . Текущей вершиной становится вершина 1,  $k = 1$  предыдущая вершина  $l = 9$ .

Рассмотрим вершину 1, степень вершины  $\delta_1 = 2$ , переходим к следующей вершине  $l = 1, k = 7$ . Вершина 7 имеет степень  $\delta_7 = 3$ , проделываем все предыдущие шаги: удаляем ребро  $(7, 1)$  и соответственно  $(1, 7)$  из матрицы смежности рис. 4, а, на рис. 4, б, ребро изображено пунктирной линией. Из массива висячих вершин выбираем любую вершину  $f$ , например  $f = 11$  и добавляем ребро  $(1, 11)$  и соответственно  $(11, 1)$  в матрицу смежности рис. 4, а), а на рис. 4, б, ребро изображено жирной линией, при этом степень текущей вершины уменьшается на 1 и  $\delta_7 = 2$ . Текущей вершиной становится вершина 11,  $k = 11$  предыдущая вершина  $l = 1$ .

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
2	0	-	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	-	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	1	-	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	-	1	1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	-	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	1	0	-	0	1	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	-	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-	0
11	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-

а

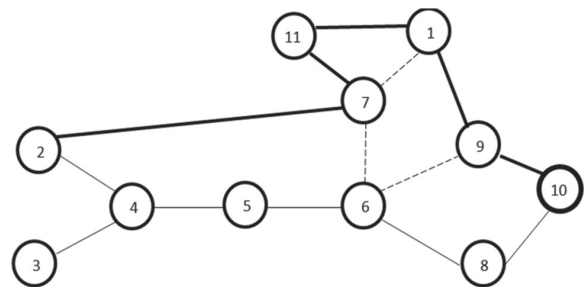


б

Рис. 4. а — Матрица смежности после выполненных операций, б — Граф, построенный после выполненных операций

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
2	0	-	0	1	0	0	1	0	0	0	0
3	0	0	-	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	1	-	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	-	0	1	0	0	0
7	0	1	0	0	0	0	-	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	1	0	-	0	1	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	-	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-	0
11	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-

а



б

Рис. 5. а — Матрица смежности после выполненных операций, б — Граф, построенный после выполненных операций

Рассматриваем вершину 11 -  $\delta_{11}=2$ , переходим к следующей вершине  $l=11, k=7$ . Вершина 7 -  $\delta_7=2$ , переходим к следующей вершине  $l=7, k=6$ .

Вершина 6 имеет степень  $\delta_6=3$ , проделываем все предыдущие шаги: удаляем ребро (6, 7) и соответственно (7, 6) из матрицы смежности рис. 5, а, удаленное ребро изображено пунктирной линией на рис. 5, б. Из массива висячих вершин выбираем любую вершину  $f$ , например  $f=2$  и добавляем ребро (7, 2) и соответственно (2, 7) в матрицу смежности рис. 5, а, ребро изображено жирной линией на рис. 5, б, при этом степень текущей вершины уменьшается на 1 и становится  $\delta_6=2$ . Текущей вершиной становится вершина 2,  $k=2$  предыдущая вершина  $l=7$ .

Продолжаем с оставшимися вершинами все предыдущие действия и на выходе получаем матрицу смежности и граф, изображенные на рис. 6.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
2	0	-	1	0	0	0	1	0	0	0	0
3	0	1	-	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	-	0	1	0	0	0
7	0	1	0	0	0	0	-	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	1	0	-	0	1	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	-	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-	0
11	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-

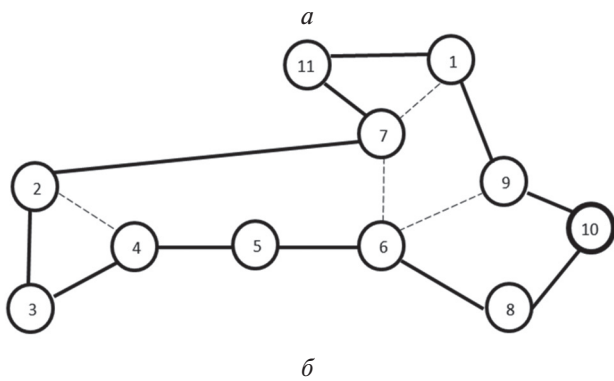


Рис.6. а – Матрица смежности, полученная после нахождения гамильтонова цикла, б – Гамильтонов цикл (10, 9, 1, 11, 7, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10), полученный при преобразовании 10-дерева  $T=(V, E_{10})$

Предложенный алгоритм будем рассматривать как одну из стадий построения приближенного решения СЗК.

Обозначим  $i$ -дерево минимальной стоимости в полном взвешенном графе  $H_n=(V, E_n), |V|=n$ . Для его построения найдем в полном взвешенном графе с множеством вершин  $V \setminus \{i\}$ , минимальное остовное дерево (МОД) и добавим к нему пару

ребер с наименьшими весами, инцидентных вершине  $i$ . Стоимость  $d(T_i)$  дерева  $T_i$ , равная сумме весов входящих в него ребер, является оценкой снизу стоимости оптимального решения  $\tau^*$  СЗК:

$$d(T_i) \leq D(\tau^*), i = \overline{1, n}$$

Трудоёмкость нахождения дерева  $T_i$  оценивается временем работы градиентного алгоритма построения МОД. Известно, что МОД графа с множеством ребер  $E$  можно получить за время  $O(|E| \log_2 |E|)$ .

Сформулируем СЗК в терминах введенных понятий.

Пусть построено МОД  $T_\vartheta, \vartheta = \{1, 2, \dots, n\}$  в полном взвешенном графе  $H_n=(V, E_n)$  с весами (стоимостями) ребер  $\{i, j\}, i, j = \overline{1, n}, d_{ij} \geq 0, i \neq j, d_{ii} = \infty$ . Каждое ребро  $\{k, l\}$  дерева  $T_\vartheta$  представим парой  $(\delta_k, \delta_l)$ , где  $\delta_k, \delta_l$  – степени вершин  $k, l$  в  $T_\vartheta, \delta_k \leq \delta_l, k, l \in \{1, 2, \dots, n\}$ . Требуется найти в дереве  $T_\vartheta$  все такие ребра, замена которых на ребро из  $H_n$  преобразует  $T_\vartheta$  в маршрут коммивояжера минимальной стоимости, представленный  $n$  парами  $(\delta_x, \delta_y), \delta_x = \delta_y = 2, x = \overline{1, n}, y \in \{1, 2, \dots, n\}, x \neq y$ .

Ясно, что такая формулировка не приводит к простому и быстрому способу построения оптимального решения. Преобразования дерева  $T_\vartheta$  в обход минимальной стоимости  $\tau^*$  в силу NP-полноты рассматриваемой задачи остается в лучшем случае ограниченным перебором множества всех маршрутов коммивояжера. Однако с помощью конечного числа операций 1- замены, определяемого соотношением (2), можно получить приближенное решение  $\tau_\vartheta$  за время соизмеримое со временем построения  $T_\vartheta$ .

Обозначим  $n(\vartheta)$  число висячих вершин в дереве  $T_\vartheta, \vartheta = \overline{1, n}$ . Если в результате нахождения дерева  $T_\vartheta$  построен маршрут коммивояжера, то он является решением СЗК, т.е. в случае  $n(\vartheta)=0, \vartheta \in \{1, 2, \dots, n\}$ , получим  $d(T_\vartheta)=D(\tau^*), \tau^* = T_\vartheta$ .

Алгоритм построения приближенного решения  $\tau_\vartheta$  СЗК состоит из двух стадий. На первой стадии строится дерево  $T_\vartheta$ . Его стоимость:

$$d(T_\vartheta) = \sum_{\{i, j\} \in T_\vartheta} d_{ij}.$$

На второй стадии выполняется алгоритм преобразования – дерева  $T=(V, E_\vartheta)$  в гамильтонов цикл полного взвешенного графа  $H_n=(V, E_n)$ . Стоимость полученного решения  $\tau_\vartheta$  равна сумме весов ребер, входящих в гамильтонов цикл графа  $H_n$ :

$$D(\tau_\vartheta) = d(T_\vartheta) = \sum_{\{i, j\} \in E_\vartheta^-} d_{ij} + \sum_{\{k, l\} \in E_\vartheta^+} d_{kl},$$

где  $E_\vartheta^-$  множество ребер удаленных из  $E_\vartheta$ ,  $E_\vartheta^+$  – множество ребер графа  $H_n$ , добавленных к  $E_\vartheta - E_\vartheta^-, |E_\vartheta^-| = |E_\vartheta^+| = n(\vartheta)$ .

Так как в любом градиентном алгоритме построения МОД ребро с наименьшим весом  $d_{\min}$

включается в  $T_\vartheta$ , а в результате выполнения второй стадии оно может быть заменено на ребро с наибольшим весом  $d_{\max}$  в  $H_n$ , то в худшем случае

$$D(\tau_\vartheta) = d(T_\vartheta) + n(\vartheta)(d_{\max} - d_{\min}) \leq D(\tau^*) + n(\vartheta)(d_{\max} - d_{\min}). \quad (3)$$

Из (3) следует, что предложенный алгоритм обеспечивает невысокую погрешность СЗК в случае незначительного расхождения между элементами матрицы стоимостей, т.е. тогда когда применение метода ветвей и границ связано с предельными объемами вычислительных ресурсов.

Оценим стоимость обхода  $\tau_\vartheta$ , построенного для метрической задачи коммивояжера (МЗК), т.е. СЗК, удовлетворяющей неравенству:

$$d_{ij} \leq d_{ik} + d_{kj}, i \neq j, i, j, k = \overline{1, n}$$

Согласно Теореме 2.2. [1] в МЗК стоимость обхода  $\tau_\vartheta$  удовлетворяет равенству

$$D(\tau_\vartheta) \leq 2D(\tau^*) - 3d_{\min} \quad (4)$$

где  $\tau^*$  — оптимальное решение,  $d_{\min} = \min_{1 \leq i \neq j \leq n} d_{ij}$

Тот факт, что оценка (4) приближенного решения  $\tau_\vartheta$  не улучшаемая, следует из примера МЗК с матрицей стоимостей  $[d_{ij}]_n, n = 2k + 1$ , в которой,

$$d_{i(i+1)} = 1,$$

$$i = \overline{1, n-2},$$

$$d_{1(n-1)} = 1,$$

$$d_{im} = k - i + 1, d_{in} = i - k,$$

$$i = \overline{k+1, n-1},$$

а все остальные значения  $d_{ij}, i \neq j$  равны 2. При  $k = 3$

		1	2	3	4	5	6	7
$[d_{ij}]_7 =$	1	$\infty$	1	2	2	2	1	3
	2	1	$\infty$	1	2	2	2	2
	3	2	1	$\infty$	1	2	2	1
	4	2	2	1	$\infty$	1	2	1
	5	2	2	2	1	$\infty$	1	2
	6	1	2	2	2	1	$\infty$	3
	7	3	2	1	1	2	3	$\infty$

На рис. 7, а утолщенными линиями представлено дерево  $T_\vartheta, \vartheta = 7$ , а на рис. 7, б изображен обход  $\tau_\vartheta$ , стоимость которого  $D(\tau_\vartheta) = n - 2 + 2k = 4k - 1$ . Но точное решение  $\tau^* = (2, 3, 7, 5, 6, 1, 4)$ , соответствующее гамильтонову циклу  $(7, 4, 5, 6, 1, 2, 3, 7)$ , имеет стоимость  $D(\tau^*) = n = 2k + 1$  (рис. 7, в) и равенство (4) для приведенного примера выполняется при любом  $k \geq 2$ .

Алгоритм построения обхода  $\tau_\vartheta$  на стадии преобразования дерева  $T_\vartheta$  в гамильтонов цикл располагает ресурсами, повышающими точность приближенного решения СЗК.

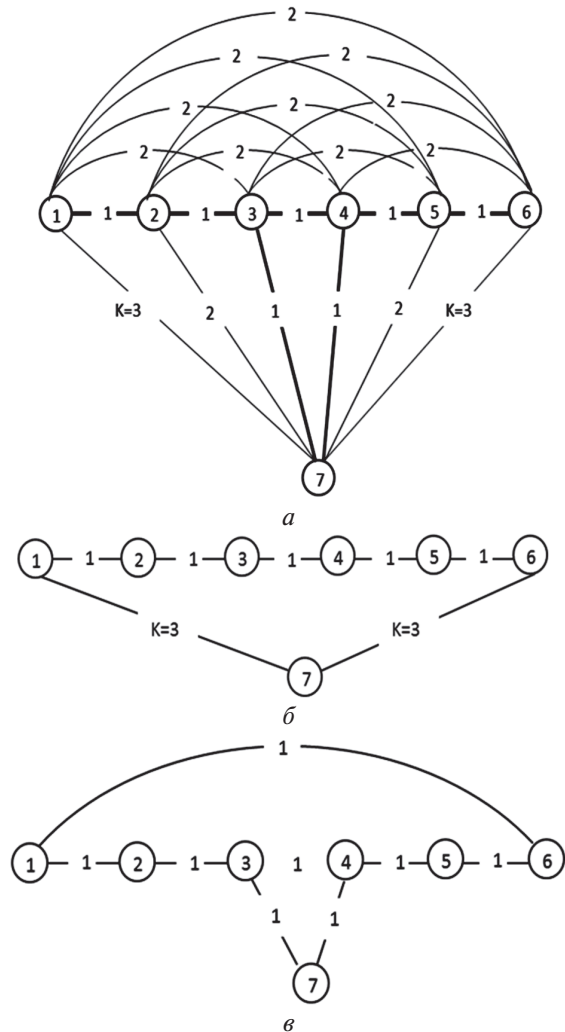


Рис. 7. а — Граф, соответствующий матрице  $[d_{ij}]_7$ , и дерево  $T_\vartheta, \vartheta = 7$ ;

б — Обход  $\tau_\vartheta$  стоимостью  $D(\tau_\vartheta) = 4k - 1$ ;

в — точное решение  $\tau^*$  стоимостью  $D(\tau^*) = 2k + 1$ ;

### Выводы

В статье рассмотрен алгоритм нахождения гамильтонова цикла по  $i$ -дереву  $T = (V, E_i)$  полного графа  $H_n = (V, E_n)$ , как один из этапов построения приближенного решения СЗК, с оценкой погрешности меньшей, чем у большинства приближенных алгоритмах.

Из приведенных расчетов следует, что полученная оценка для данного алгоритма является не улучшаемой, а алгоритм преобразования  $i$ -дерева в гамильтонов цикл располагает ресурсами, которые повышают точность и быстродействие приближенного решения симметричной задачи коммивояжера.

### Список литературы:

1. Панишев А.В. Модели и методы оптимизации замкнутых маршрутов на транспортной сети / А.В. Панишев, А.В. Морозов. — Житомир: ЖГТУ, 2014. — 316 с.
2. Пападимитриу Х. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность / Х. Пападимитриу, К. Стайглиц. — М.: Мир, 1985. — 510 с.

Поступила до редколлегии 10.05.2017



УДК 004.05

Д.К. Міхнов<sup>1</sup>, А.В. Міхнова<sup>2</sup>, К.С. Чиркова<sup>3</sup>, А.В. Чінілін<sup>4</sup><sup>1</sup> ХНУРЕ, м. Харків, Україна, mikhnova@nure.ua<sup>2</sup> ХНУРЕ, м. Харків, Україна, mikhnov@nure.ua<sup>3</sup> ХНУРЕ, м. Харків, Україна, yes.chirkova@gmail.com<sup>4</sup> Інститут загальної та невідкладної хірургії, м. Харків, Україна

## КРИТЕРІЙ ВИБОРУ СТРУКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЗАКЛАДІВ СЛУЖБИ КРОВІ

В статті запропоновано критерій вибору організаційно-технічної структури спеціалізованої медичної інформаційної системи закладів Служби крові. Критерій враховує значність етапу технологічного процесу у встановлених контрольних точках, відповідність можливостей системи вимогам збору/видачі інформації, сукупність витрат на реалізацію організаційно-технічної структури системи. Використання критерію доцільно для оцінювання організаційно-технічної структури при впровадженні нової або модернізації існуючої системи.

ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ, ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНА СТРУКТУРА, КРИТЕРІЙ ВИБОРУ, ІНФОРМАЦІЙНИЙ СУПРОВІД

### Вступ

Спеціалізована медична інформаційна система закладів Служби крові (СМІС ЗСК) – це автоматизована система, що забезпечує повний інформаційний супровід виробничих (технологічних) процесів, а саме: реєстрацію донорів та осіб, яким заборонено виконувати донорські функції; проведення первинних клініко-лабораторних досліджень крові донора та медичного огляду донорів; заготівлю донорської крові; виробництво компонентів донорської крові; проведення імуногематологічних та біохімічних лабораторних досліджень донорської крові; скринінг на гемотрансмісивні інфекції; контроль якості донорської крові та її компонентів; бактеріологічний контроль донорської крові та її компонентів і умов заготівлі; паспортизацію компонентів донорської крові; довгострокове зберігання компонентів крові у відповідних умовах (карантинізацію); розподіл, видачу компонентів крові по запитам закладів охорони здоров'я та контроль за їх використанням. Функціонування системи має відповідати існуючим стандартам, специфікаціям, регламентам проведення виробничих (технологічних) процесів, нормативам процедур, правилам та законам захисту інформації, а також документування та протоколювання виконання робіт. В свою чергу, ефективність функціонування СМІС ЗСК забезпечується організаційними, технічними, телекомунікаційними, програмними та іншими проектними рішеннями при її побудові, що визначають організаційно-технічну структуру системи.

### 1. Постановка проблеми

СМІС ЗСК має забезпечувати облік та контроль параметрів та факторів, що безпосередньо впливають на якість продуктів крові, безпеку донора та реципієнта, тому така система обов'язково потребує формування критерію вибору її ефективно працюючої організаційно-технічної структури як на етапі проектування, так і на етапі модернізації. В галузі охорони здоров'я поняття ефективності не прийнято ототожнювати тільки з економічними

категоріями [1]. Питання прийнято розглядати з соціальної, медичної, організаційної позицій, а економічну складову інтерпретувати як найбільш економічне використання наявних ресурсів [2].

Специфіка трансфузіології на перший план виводить необхідність отримання потрібних об'ємів якісних компонентів і препаратів крові та забезпечення високого рівня гемобезпеки. Показники, що співвідносяться з оцінюванням гемобезпеки визначають якість процесів виробничої та клінічної трансфузіології. Виходячи з цього – ефективність функціонування системи, що забезпечує інформаційне супроводження процесів, має оцінюватися з урахуванням потрібних об'ємів і рівня якості отриманого продукту. Критерій щодо оптимізації організаційно-технічної структури має характеризувати ступінь досягнення результату, а саме своєчасне отримання повної і достовірної інформації при супроводженні процесів виробничих (технологічних) етапів діяльності ЗСК. Націленість отримувати оперативну, повну та достовірну інформацію призводить до пошуку раціональних проектних рішень з інформатизації і автоматизації повного технологічного циклу трансфузіології шляхом впровадження або модернізації СМІС. Таким чином, формування критерію вибору організаційно-технічної структури СМІС ЗСК є однією з актуальних задач на шляху проведення такого оцінювання і вибору раціонального варіанту [3].

### 2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вибір СМІС ЗСК серед різноманіття існуючих систем, а також визначення напрямів розробки та вдосконалення є складною задачею через специфіку предметної галузі, для якої необхідне постійне відстеження таких показників, як відсоток браку, кількість випадків несприятливих реакцій та ускладнень трансфузій і т.п. Питання використання та оцінювання ІС розглядалися в працях багатьох вчених, однак, треба зазначити, що на теперішній час не запропонована однозначна, чітка системи критеріїв вибору організаційно-технічних

структур СМІС ЗСК для проведення оцінювання можливих рішень з розробки та впровадження нової або модернізації існуючої системи в закладах служби крові [4].

Аналіз літератури, щодо удосконалення роботи СК призводить до висновку, що основним сучасним напрямом є забезпечення програми GMP, тобто найкращої виробничої практики при отриманні компонентів і препаратів крові [5], при цьому суттєвим є відповідність стандартам, специфікаціям, регламентам проведення роботи, нормативам процедур, правилам та законам захисту інформації, а також документування та протоколювання виконання робіт.

В рекомендаціях, правилах та програмах із забезпечення ефективної роботи ЗСК певне місце займають вимоги до організації інформаційного супроводу [6]. Узагальнюючи матеріал можна зазначити необхідність брати до уваги наступні вимоги:

- ступінь відповідності СМІС ЗСК вимог нормативної бази та найкращим виробничим практикам щодо якості продуктів крові;
- витрати на розробку та вдосконалення СМІС ЗСК;
- витрати на технічне забезпечення впровадження СМІС ЗСК;
- витрати на впровадження СМІС ЗСК;
- рівень можливих помилок інформаційного супроводу процесів виробничої трансфузіології;
- функціональність СМІС ЗСК;
- витрати часу на обробку інформації.

Раціональність побудови структура СМІС ЗСК може бути оцінена набором показників, з використанням комбінації методів оцінювання ефективності і якості [7].

Таким чином, побудова критерію вибору організаційно-технічної структури СМІС має враховувати усі властивості системи та фактори, що на неї впливають, з урахуванням обмежень та заданих вимог.

Метою даної статті є розробка критерію вибору організаційно-технічної структури СМІС, за допомогою якого можна обрати таку, що дасть можливість переходу на більш високий рівень організації інформаційного супроводження процесів в закладах ЗСК.

### 3. Основний матеріал та результати

Інформаційне супроводження процесів трансфузіології реалізує штатний персонал ЗСК за допомогою апаратних та програмних засобів СМІС. Автоматизація інформаційного супроводження процесів в ЗСК знижує ризики впливу людського фактору на достовірність інформації.

Узагальнено до основних завдань інформаційного супроводження процесів в ЗСК можна віднести:

- своєчасну реєстрацію показників процесів;
- контроль дотримання вимог стандартів і правил;

– контроль виконання регламентів кожного етапу виробничого ланцюга;

– своєчасне відстеження позаштатних ситуацій для оперативного прийняття рішень.

Одним із способів проведення оцінювання організаційно-технічних рішень при побудові структури СМІС ЗСК є залучення експертів [8].

Експертне оцінювання СМІС ЗСК включає:

- аудит розробника СМІС ЗСК;
- визначення вимог користувача до СМІС ЗСК;
- визначення функціональних вимог до СМІС ЗСК;
- визначення структури та вимог до програмного забезпечення;
- визначення структури та вимог до технічного забезпечення;
- визначення витрат на СМІС ЗСК;
- оцінка ризиків.

Аудит або анкетування розробника/постачальника СМІС ЗСК дозволяє визначити інформацію про розробника/постачальника з питань його кваліфікації, зручності використання, супроводження, модернізації СМІС ЗСК.

Вимоги користувачів містять в собі вимоги нормативно-правової документації служби крові, правила формування вхідних, вихідних документів, правила взаємодії підрозділів протягом виконання технологічних процесів. Структура вимог користувачів складається з вимог до складових виробничого процесу; вимог до системи у цілому; вимог до захисту інформації; вимог до адміністрування; обмежень (вартість, строки виконання робіт, сумісність з існуючим обладнанням та системами, можливість нарощування функцій та модернізації, тощо).

Функціональні вимоги описують функції СМІС ЗСК; дані, які необхідні для виконання функцій; інтерфейси взаємодії СМІС з користувачем, обладнанням, зв'язки з іншими системами.

Вимоги до програмного забезпечення передбачають визначення, яке програмне забезпечення має бути встановлено на робочих місцях користувачів та сервері.

Вимоги до технічного обладнання передбачають визначення мінімальних вимог до технічного обладнання, необхідного для функціонування СМІС ЗСК.

При виборі/розробці СМІС ЗСК експерти повинні враховувати капітальні та експлуатаційні витрати. Капітальні витрати включають в себе витрати на:

- придбання (розробку) СМІС ЗСК (вартість програмного забезпечення);
- придбання апаратного забезпечення (обладнання), необхідного для функціонування СМІС ЗСК;
- створення (модернізацію) комп'ютерної мережі;
- перенесення даних;
- налаштування СМІС ЗСК;

– навчання персоналу керуванню та користуванню СМІС ЗСК;

– валідацію СМІС ЗСК.

Експлуатаційні витрати включають в себе витрати на:

– супроводження СМІС ЗСК (управління, адміністрування, модернізація, оновлення);

– технічне обслуговування комп'ютерної мережі;

– технічне обслуговування обладнання;

– витратні матеріали (заправка картриджів, папір для друку вихідних форм та етикеток);

– заробітну плату персоналу, що буде займатися адмініструванням та супроводженням СМІС ЗСК.

Інформаційне супроводження процесів в ЗСК передбачає визначення функцій СМІС ЗСК, які можуть вплинути на якість продуктів крові, безпеку донорів та реципієнтів; розробку способів контролю функцій, що пов'язані з ризиком, впливають на якість продуктів крові, безпеку донорів та реципієнтів.

Усі вимоги (нормативні вимоги) можуть бути спроектовані на контрольні точки в технологічному процесі трансфузіології в ЗСК.

В кожній контрольній точці виконуються певні функціональні дії, від якості виконання яких залежить, у кінцевому рахунку, якість продуктів крові, гемобезпека донорів та реципієнтів.

В ідеалі СМІС має забезпечити у кожній контрольній точці повний контроль правильності виконання того чи іншого етапу технологічного процесу, а, як наслідок, мати можливість отримувати необхідний об'єм даних та формувати потрібні управляючі впливи.

Робота СМІС в усіх контрольних точках загалом впливає на кінцевий результат. Але, вклад кожної контрольної точки може бути оцінено експертами

з урахуванням її значності у виконанні функціональних дій. А крім того, існує реальна відповідність можливостей СМІС вимогам збору/видачі інформації в контрольній точці.

Витрати на забезпечення СМІС в даній контрольній точці всіма видами ресурсів можуть бути прогнозовані як на етапі проектування, так і на реальному об'єкті.

Таким чином, прийняв за основу відомий функціонально-вартісний критерій, для оцінювання та вибору організаційно-технічної структури СМІС ЗСК можна запропонувати такий критерій:

$$K = \max \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i \mu_i}{c_i},$$

де  $K$  – критерій вибору організаційно-технічної структури;  $\lambda_i$  – нормований показник значності етапу технологічного процесу в  $i$ -й контрольній точці, який може змінюватися у діапазоні від 0 до 1;  $\mu_i$  – нормований показник відповідності можливостей СМІС вимогам збору/видачі інформації в  $i$ -й контрольній точці, який може змінюватися у діапазоні від 0 до 1;  $c_i$  – сукупні витрати на реалізацію організаційно-технічної структури СМІС ЗСК в  $i$ -й контрольній точці;  $N$  – число контрольних точок.

Одним з важливих питань є визначення переліку елементів і дій для етапу виробничого (технологічного) процесу заготівлі крові і виготовлення її компонентів. На підставі змістовного наповнення етапу експертним шляхом визначаються нормовані показники для критерію і вартість реалізації функцій і додаткових сервісів організаційно-технічної структури СМІС. На прикладі одного з процесів виробничої трансфузіології, а саме – реєстрації донорів в ЗСК, в табл. 1 наведено дані, які опрацьовують експерти і що враховуються для оцінювання.

Таблиця 1

Перелік елементів і дій процесу реєстрації донора зі змістом функцій і додаткових сервісів СМІС ЗСК

Елемент бізнес-процесу	Зміст дій	Функція системи	Додаткові сервіси
1 Отримання документів, що засвідчує особу	Введення первинної інф. з паспорту/військового квитка/військового посвідчення / ІКП / посвідчення донора відповідно до наказу № 385 та Закону про донорство. Реєстрація звертання (дата, вид звертання).	Облік та контроль наявності інформації про особу, що звернулася.	– автоматичне зчитування та введення первинної інформації з посвідчення/ картки донора за ШК; – автоматичне зчитування та введення первинної інформації з посвідчення/ картки донора за Pfid; – автоматичне зчитування та введення первинної інформації за відбитком пальця; – швидкий автоматизований пошук інформації про донора по частково введеному ПІБ; – автоматизований пошук інформації про донора за № паспорту/посвідчення донора, ППН; – реєстрація факту звернення в ІС.
2 Перевірка відведень та реєстрація звернення за видом донації	Перевірка на наявність абсолютних протипоказань (відповідно додатку 3 до порядку мед. обстеження наказу №385).	Контроль наявності абсолютних відведень.	– формування запиту до регіональної БД служби крові та отримання відповіді; – формування запиту до Національного реєстру служби крові та отримання відповіді; – формування запиту до локальної БД закладу служби крові та отримання відповіді; – формування запиту до БД суміжних служб та отримання відповіді.

	Перевірка на наявність тимчасових протипоказань (відповідно додатку 3 до порядку мед. обстеження наказу №385).	Контроль наявності тимчасових відведень.	– формування запиту до регіональної БД служби крові та отримання відповіді; – формування запиту до Національного реєстру служби крові та отримання відповіді; – формування запиту до локальної БД закладу служби крові та отримання відповіді; – формування запиту до БД суміжних служб та отримання відповіді.
	Перевірка інтервалу між донаціями (відповідно додатку 4 до порядку мед. обстеження наказу №385.)	Контроль інтервалу між донаціями.	– формування запиту до регіональної БД служби крові та отримання відповіді; – формування запиту до Національного реєстру служби крові та отримання відповіді; – формування запиту до локальної БД закладу служби крові та отримання відповіді.
	Перевірка за віком (відповідно Закону УКРАЇНИ про донорство крові і її компонентів).	Контроль обмеження за віком.	– автоматичний розрахунок віку та перевірка придатності до донації за віковим критерієм.
	Перевірка за вагою (наказ № 385.)	Контроль обмеження за вагою.	– автоматизований імпорт даних з вагів та перевірка можливості реєстрації донації за нормами ваги.
	Перевірка кількості регулярних донацій на рік за статтю та об'ємом зданої плазми (наказ № 385).	Контроль кількості регулярних донацій на рік в залежності від статі.	– автоматичний підрахунок кількості регулярних донацій на рік та аналіз можливості донації.
3 Введення, корегування, перевірка повної інформації про донора, відведену особу	Облік, корегування даних про донора (ПІБ, дата народження, стать, серія, № паспорт, ІПН, адреса, місце роботи, телефон, фото, змінене ПІБ)	Облік даних про донора, відведена особу.	– об'єднання/роз'єднання облікових записів донорів; – імпорт фото з web камери; – імпорт фото зі сканеру; – зчитування даних посвідчення (картки) донора; – облік історії зміни прізвища донора/особи; – валідація введення даних; – аудит зміни даних в системі; – автоматична генерація унікального номеру донора;
4 Згода донора	відповідно наказів №323, № 385, № 301. Реєстрація поточного візиту (виду донації). Надання інформації донору. Заповнення інформаційних згод донором. Отримання підписів від донора.	Облік згоди донора на донацію.	– автоматична генерація унікального номеру донора в межах країни; – автоматична генерація унікального номеру донації; – автоматична генерація штрих-коду донора, донаціїю – імпорт до ІС інформаційної згоди зі сканеру; – ЕЦП.
5 Формування супровідної документації та ідентифікатора особи	Формування Картки донора резерву, облікової картки, анкети донора. Формування ідентифікатору особи (накази № 323, №385, № 301).	Формування вихідних форм.	– автоматичне формування та друк вихідних форм згідно наказів № 323, № 385, № 301; – автоматичне формування та друк унікального ідентифікатору.

Процедура оцінювання організаційно-технічних рішень з побудови або модернізації СМІС, яка забезпечує потрібний функціонал, може проводитися на більш детальному рівні з врахуванням ступеню автоматизації отримання певних параметрів всіх дій етапу [9], які узагальнюються в контрольних точках.

### Висновки

Запропонований критерій може бути використано для проведення узагальненого оцінювання при виборі організаційно-технічної структури СМІС ЗСК. За потребою деталізації досліджень для конкретного етапу критерій є базовим.

### Список літератури:

1. Орлов Е.М. Категория эффективности в системе здравоохранения [Текст] / Е.М. Орлов, О.Н. Соколова // Фундаментальные исследования. – 2010. – №4. – С.70–75.  
2. Оценка эффективности деятельности медицинских организаций [Текст] / под ред. А.И.Вялкова. – М.: ГЭОТАР–МЕД, 2004. – 112 с.  
3. Рычков А.И. Эффективность от внедрения ИТ на высокотехнологичных предприятиях [Электронный ресурс] // Труды МГТА :электронный

журнал. – Режим доступа: <http://do.gendocs.ru/docs/index-320803.html> – 09.04.2012.  
4. Редькина Н. С. Эффективность информационных технологий в библиотеках [Текст] / Н. С. Редькина // Библиосфера. – 2011. – №1. – С. 24–31.  
5. Жибурт Е.Б. Надлежащая производственная практика (GMP) организации службы крови. [Текст] / Е.Б Жибурт // ИД «КДУ», «Университетская книга». – 2016. – 90 с.  
6. Менеджмент якості в службі крові [Текст]: посіб. / за ред. С. Видиборця, О. Сергієнка. – Київ – Вашингтон, 2016. – С. 216–230.  
7. Разумников С.В. Анализ существующих методов оценки эффективности информационных технологий для облачных ИТ сервисов [Текст] / С.В. Разумников // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – С.1–8.  
8. Кузьмина О.М. Применение метода экспертных оценок в функционально-стоимостном анализе [Текст] / О.Н. Кузьмина // Сборник научных трудов SWorld. Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте и образовании 2012: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Одесса, 2013. – Вып. 4. – Т. 27. – С. 85–86.  
9. Mikhnova, A Information support model of production transfusion processes [text] / A. Mikhnova, D. Mikhnov, K. Chyrkova // Eastem-European Journal of Enterprise Technologies. – X, 2016 – № 3/3(81). 2016. – С. 36–43.

Поступила до редколегії 01.06.2017





А.Г. Каграманян<sup>1</sup>, Г.Г. Четвериков<sup>2</sup>, В.В. Шляхов<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>ХНУ, г. Харьков, Украина

<sup>2,3</sup>ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, chetvergg@gmail.com

## МУЛЬТИАЛГЕБРАИЧЕСКИЕ ДИСКРЕТНЫЕ СИСТЕМЫ ПРИ НАЛИЧИИ АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НОСИТЕЛЯ. СООБЩЕНИЕ 3

Во многих практических ситуациях ограничение множества входных сигналов в виде положительного конуса пространства  $\langle L, R \rangle$  не всегда корректно. Например, при изучении органа зрения человека ограничиваются не только положительными, но и излучениями с не очень большими энергиями, поскольку чрезмерно интенсивные могут нарушить зрительный орган. В этом случае достаточно приемлемой моделью множества входных сигналов является выпуклое тело линейного пространства. Поэтому в данной статье мы рассмотрим линейные предикаты именно с такой областью определения.

ПРЕДИКАТ, ЛИНЕЙНЫЙ ПРЕДИКАТ, ЛИНЕЙНОЕ ПРОСТРАНСТВО, АЛГЕБРА, АЛГЕБРАИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА, МУЛЬТИАЛГЕБРАИЧЕСКИЕ ДИСКРЕТНЫЕ СИСТЕМЫ

### Введение

Во многих практических ситуациях множество входных сигналов исследуемого объекта представляет собой некоторую алгебраическую структуру. Объясняется это тем, что, как правило, между элементами этого множества существуют определенные связи, которые можно интерпретировать как алгебраические операции. Как уже говорилось выше, правильное распознавание соответствующей структуры во многом определяет адекватность математической модели в целом. В рамках компараторной идентификации это распознавание должно вестись на языке экспериментально проверяемых свойств отношений или предикатов. Не останавливаясь на экспериментальной части, что выходит за рамки данной работы, дадим теоретическое решение данной задачи для такой алгебраической структуры, как линейное пространство над некоторым полем. Подобная структура широко распространена на практике [1]. Областью определения операторов, которые в дальнейшем будут изучаться, в данной работе является линейное пространство [2, 3].

### 1. Постановка задачи

Во многих практических ситуациях ограничение множества входных сигналов в виде положительного конуса пространства  $\langle L, R \rangle$  не всегда корректно. Например, при изучении органа зрения человека ограничиваются не только положительными, но и излучениями с не очень большими энергиями, поскольку чрезмерно интенсивные могут нарушить зрительный орган. В этом случае достаточно приемлемой моделью множества входных сигналов является выпуклое тело линейного пространства. Поэтому в данной статье рассмотрим линейные предикаты именно с такой областью определения.

### 2. Сужение данных в виде выпуклого тела линейного пространства

Определение 1. Пусть  $0 \leq \lambda \leq 1$ , тогда если для любых двух элементов  $x, y \in V \subset L$  отрезок

$[x, y] = \{z = \lambda x + (1 - \lambda)y\}$  также принадлежит  $V$ , то будем называть множество  $V$  *выпуклым телом* пространства  $\langle L, R \rangle$  при условии:  $\text{aff } V = L$ .

Допустим, на  $V \times V$  выполняются:

- 1) рефлексивность;
- 2) симметричность;
- 3) транзитивность;
- 4) выпуклая аддитивность: пусть числа  $\alpha, \beta > 0$  удовлетворяют условию  $\alpha + \beta = 1$  и  $E(x, y) = E(x', y') = 1$ , тогда  $E(\alpha x + \beta x', \alpha y + \beta y') = 1$ ;
- 5)  $n$ -мерность: найдется в  $V$  система линейно независимых векторов  $\{e_1, \dots, e_{n+1}\}$  такая, что для любого  $x \in V$  существует такое множество индексов  $I(x) \subset \{1, 2, \dots, n+1\}$  и единственный набор чисел  $\beta_1(x), \dots, \beta_{n+1}(x)$ , для которых выполняются условия

$$6) E(\alpha_0(x)x + \sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x)e_i, \sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x)e_i) = 1,$$

причем  $\alpha_0(x) = [\sum_{i \in I(x)} \beta_i(x)]^{-1} > 0$ ,

$$\alpha_i(x) = \alpha_0(x)\beta_i(x) > 0, \text{ при } i \in I(x),$$

$$\alpha_i(x) = \alpha_0(x)\beta_i(x) \geq 0 \text{ при } i \notin I(x)$$

$$\text{и } \alpha_0(x) + \sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x) = 1, \sum_{i \notin I(x)} \alpha_i(x) = 1.$$

Обозначим  $\sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x)e_i = x_1$ ,  $\sum_{i \notin I(x)} \alpha_i(x)e_i = x_2$ .

Свойство  $n$ -мерности тогда можно записать  $E(\alpha_0(x)x + x_1, x_2) = 1$ ;

7) непрерывность: функционалы  $\{a_i(x)\}_{i=1}^{n+1}$  непрерывны в метрике  $L$ ;

8) выпуклая полуаддитивность: если  $0 \leq \gamma \leq 1$  и  $E(\gamma(x) + (1 - \gamma)t, \gamma y + (1 - \gamma)t) = 1$ , то  $E(x, y) = 1$  для  $x, y \in V$ ;

9) выпуклая однородность: пусть элементы  $x, y, \lambda x + t, \lambda y + t \in V$  и  $E(\lambda x + t, \lambda y + t) = 1$ , тогда  $E(x, y) = 1$ .

Заметим, что если предикат  $E(x, y)$  линеен и задан на  $V \times V$ , то все перечисленные выше свойства кроме  $n$ -мерности непосредственно вытекают

из вида предиката. Свойство  $n$ -мерности мы обобщим ниже.

Докажем два вспомогательных утверждения.

Утверждение 1. Если предикат  $E(x, y)$  удовлетворяет свойствам 1)–8), то:

а) для любых пар  $\{x_i, y_i\}_{i=1}^r \in V \times V$  и любого набора чисел вида  $\{\alpha_i(x)\}_{i=1}^r \geq 0, \sum_{i=1}^r \alpha_i = 1$  из равенств  $E(x_i, y_i) = 1, i = \overline{1, r}$  вытекает  $E(\sum_{i=1}^r \alpha_i y_i) = 1$ ;

б) для любых  $x, y, z_1, \dots, z_r \in V$  и любых чисел  $\alpha, \gamma_1, \dots, \gamma_r \geq 0, \alpha, \gamma_1, \dots, \gamma_r = 1$  из равенства

$$E(\alpha x + \sum_{i=1}^r \gamma_i z_i, \alpha y + \sum_{i=1}^r \gamma_i z_i) = 1 \text{ вытекает } E(x, y) = 1.$$

Доказательство. Первое утверждение докажем индукцией по  $r$ . Из свойства выпуклой аддитивности следует его справедливость при  $r = 2$ , т.е. фиксирована база индукции. Допустим, оно справедливо для  $r$  от 2 до  $k$ . Докажем его для  $r = k + 1$ . Для этого рассмотрим  $\{x_i, y_i\}_{i=1}^{k+1} \in V \times V, \{\alpha_i(x)\}_{i=1}^{k+1} \geq 0, \sum_{i=1}^{k+1} \alpha_i x_i = 1, E(x_i, y_i) = 1, i = \overline{1, k+1}$ .

Введем набор чисел

$$\gamma_{k+1} = 1 - \alpha_{k+1}, \gamma_i = \alpha_i / \gamma_{k+1}, i = \overline{1, k},$$

без ограничения общности можно считать

$$\alpha_{k+1} \neq 1 \text{ т.е. } \gamma_{k+1} \neq 0 \text{ тогда } \gamma_i \geq 0, i = \overline{1, k+1} \text{ и}$$

$$\sum_{i=1}^k \gamma_i = \frac{1}{\gamma_{k+1}} \sum_{i=1}^k \alpha_i = \frac{1}{1 - \alpha_{k+1}} \sum_{i=1}^k \alpha_i = \frac{1 - \alpha_{k+1}}{1 - \alpha_{k+1}} = 0,$$

отсюда по предположению индукции имеем

$$E(\sum_{i=1}^k \gamma_i x_i, \sum_{i=1}^k \gamma_i y_i) = 1.$$

Обозначим  $z_1 = \sum_{i=1}^k \gamma_i x_i, z_2 = \sum_{i=1}^k \gamma_i y_i,$

тогда  $E(z_1, z_2) = E(x_{k+1}, y_{k+1}) = 1$  и из выпуклой аддитивности можно записать

$$E(\gamma_{k+1} z_1 + (1 - \gamma_{k+1}) x_{k+1}, \gamma_{k+1} z_2 + (1 - \gamma_{k+1}) y_{k+1}) = 1,$$

но  $\gamma_{k+1} z_1 = \gamma_{k+1} \sum_{i=1}^k \gamma_i x_i = \sum_{i=1}^k \alpha_i x_i.$

Аналогично  $\gamma_{k+1} z_2 = \sum_{i=1}^k \alpha_i y_i.$

Отсюда  $E(\sum_{i=1}^{k+1} \alpha_i x_i, \sum_{i=1}^{k+1} \alpha_i y_i) = 1.$

Последнее равенство означает, что первая часть утверждения доказана.

Для доказательства второй части воспользуемся аналогичными индуктивными рассуждениями. При  $r = 1$  утверждение (б) совпадает с выпуклой полуаддитивностью. Пусть при  $r = m$  утверждение верно, покажем, что оно верно и для  $r = m + 1$ . Рассмотрим

$$\xi_{m+1} = 1 - \gamma_{m+1}, \alpha' = \frac{\alpha}{\xi_{m+1}}, \xi_i = \frac{1}{\xi_{m+1} \gamma_i}, i = \overline{1, r},$$

тогда

$$\begin{aligned} \alpha' + \sum_{i=1}^m \xi_i &= 1, \alpha \alpha' + \sum_{i=1}^{m+1} \gamma_i z_i = \\ &= (\alpha' x + \sum_{i=1}^m \xi_i z_i) \xi_{m+1} + (1 - \xi_{m+1}) z_{m+1} \end{aligned}$$

Аналогично

$$\alpha y + \sum_{i=1}^{m+1} \gamma_i z_i = (\alpha' y + \sum_{i=1}^m \xi_i z_i) \xi_{m+1} + (1 - \xi_{m+1}) z_{m+1}.$$

Поскольку выполняется

$$E(\alpha' x + \sum_{i=1}^{m+1} \gamma_i z_i, \alpha y + \sum_{i=1}^{m+1} \gamma_i z_i) = 1,$$

то из предыдущих равенств и выпуклой полуаддитивности получим

$$E(\alpha' x + \sum_{i=1}^m \xi_i z_i, \alpha' y + \sum_{i=1}^m \xi_i z_i) = 1.$$

Отсюда по предположению индукции имеем  $E(x, y) = 1$ . Таким образом, доказательство закончено.

Утверждение 2. Пусть для любого  $x \in V$  задан оператор  $Ax$  следующим соотношением

$$Ax = \frac{1}{\alpha_0(x)} \left( \sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x) e_i - \sum_{i \in J(x)} \alpha_i(x) e_i \right) = \frac{x_2 - x_1}{\alpha_0(x)},$$

где  $x_1, x_2, \alpha_0, \dots, \alpha_{n+1}, e_1, \dots, e_{n+1}$  определены в свойстве  $n$ -мерности. Тогда для любых  $x, y \in V$  и чисел  $\alpha, \beta \geq 0, \alpha + \beta = 1$  выполняется  $A(\alpha x + \beta y) = \alpha Ax + \beta Ay$ .

Доказательство. Пусть

$$\alpha, \beta \geq 0, \alpha + \beta = 1 \text{ и } x, y \in V.$$

Введем в рассмотрение числа

$$\gamma = \frac{\alpha \alpha_0(y)}{\alpha \alpha_0(y) + \beta \alpha_0(x)}, \gamma' = \frac{\beta \alpha_0(y)}{\alpha \alpha_0(y) + \beta \alpha_0(x)}.$$

Ясно, что  $\gamma + \gamma' = 1$ . Для произвольных  $x, y \in V$  по свойству  $n$ -мерности можно записать

$$E(\alpha_0(x)x + x_1, x_2) = 1, E(\alpha_0(y)y + y_1, y_2) = 1.$$

Отсюда согласно выпуклой аддитивности

$$E(\gamma[\alpha_0(x)x + x_1] + \gamma'[\alpha_0(y)y + y_1], \gamma x_2 + \gamma' y_2) = 1 \text{ или}$$

$$E([\gamma \alpha_0(x)x + \gamma' \alpha_0(y)y] + (\gamma x_1 + \gamma' y_1), \gamma x_2 + \gamma' y_2) = 1 \quad (1)$$

Обозначим

$$\gamma x_1 + \gamma' y_1 = \sum_{i=1}^{n+1} \delta_i e_i$$

(это возможно, так как  $x_1, y_1 \in J(e_1, \dots, e_{n+1})$  — линейная оболочка),

$$\gamma x_2 + \gamma' y_2 = \sum_{i=1}^{n+1} \delta'_i e_i$$

$$\text{и } \alpha_0(x) \gamma x + \alpha_0(y) \gamma' y = \frac{\alpha_0(x) \alpha_0(y)}{\alpha \alpha_0(y) + \beta \alpha_0(x)}$$

$$[\alpha x + \beta y] = \Theta(\alpha Ax + \beta Ay)$$

Введем теперь множество индексов

$$N = \{i : \delta_i > \delta'_i\}$$

и обозначим  $u = \sum_{i \in N} (\delta_i - \delta'_i)e_i$ ,  $v = \sum_{i \in N} (\delta'_i - \delta_i)e_i$ ,

тогда  $\gamma x_1 + \gamma' y_1 = \sum_{i \in N} \delta'_i e_i + \sum_{i \notin N} \delta_i e_i + u = z + u$ ,

$$\gamma x_2 + \gamma' y_2 = \sum_{i \in N} \gamma'_i e_i + \sum_{i \notin N} \delta_i e_i + v = z + v.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} v - u &= \gamma(x_2 - x_1) + \gamma'(y_2 - y_1) = \gamma\alpha_0(x)Ax + \gamma'\alpha_0(y)Ay = \\ &= \Theta[\alpha Ax + \beta Ay]. \end{aligned}$$

Значит,  $\alpha Ax + \beta Ay = \frac{(v-u)}{\Theta}$ .

Теперь, используя новые обозначения, преобразуем (1). Оно примет вид

$$E([\gamma\alpha_0(x)x + \gamma'\alpha_0(y)y] + (\gamma x_1 + \gamma' y_1), \gamma x_2 + \gamma' y_2) = 1.$$

$$E([\gamma\alpha_0(x)x + \gamma'\alpha_0(y)y] + u + z, v + z) = 1, \quad (2)$$

$$E(\Theta[\alpha x + \beta y] + u + z, v + z) = 1.$$

Пусть теперь  $\mu = \sum_{i \in N} (\delta_i - \delta'_i)$ ,  $\nu = \sum_{i \in N} (\delta'_i - \delta_i)$ . Тогда из (2) вытекает

$$E\left(\mu \frac{\Theta[\alpha x + \beta y] + u}{\mu} + z, \nu \frac{u}{\nu} + z\right) = 1. \quad (3)$$

Заметим, что сумма коэффициентов в равенствах (2) при  $x, y, \{e_i\}_{i=1}^{n+1}$  равна 1, т.е.

$$\gamma\alpha_0(x) + \gamma'\alpha_0(y) + \sum_{i \in I(x)} \gamma\alpha_i(x) + \sum_{i \in I(y)} \gamma'\alpha_i(y) = 1.$$

С другой стороны,

$$\sum_{i=1}^{n+1} \delta_i = \sum_{i \in I(x)} \gamma\alpha_i(x) + \sum_{i \in I(y)} \gamma'\alpha_i(y),$$

$$\sum_{i=1}^{n+1} \delta'_i = \sum_{i \in I(x)} \gamma\alpha_i(x) + \sum_{i \in I(y)} \gamma'\alpha_i(y) = 1.$$

Из последних трех равенств получим

$$\gamma\alpha_0(x) + \gamma'\alpha_0(y) + \sum_{i=1}^{n+1} \delta_i = \sum_{i=1}^{n+1} \delta'_i = 1,$$

$$\Theta + \sum_{i \in N} \delta_i + \sum_{i \notin N} \delta'_i = \sum_{i \in N} \delta'_i + \sum_{i \notin N} \delta_i = 1,$$

$$\Theta + \sum_{i \in N} (\delta_i - \delta'_i) = \sum_{i \notin N} (\delta'_i - \delta_i), \Theta + \mu = \nu,$$

$$\frac{\Theta[\alpha x + \beta y]}{\gamma} + \frac{u}{v} = \frac{(v-\mu)(\alpha x + \beta y)}{\nu} + \frac{\mu u}{\nu \mu}.$$

Заметим, что  $\alpha x + \beta y \in V$ ,  $\frac{u}{v} \in V$ . Поскольку

$$\frac{(v-\mu)}{\nu} + \frac{\mu}{\nu} = 1, \text{ то } \frac{\Theta}{\nu}(\alpha x + \beta y) + \frac{\mu u}{\nu \mu} \in V, \text{ тогда из (3)}$$

имеем

$$E\left(\mu \frac{\Theta[\alpha x + \beta y] + u}{\mu} + z, \gamma \frac{v}{\gamma} + z\right) = 1,$$

$$E\left(\nu \left[\frac{\Theta}{\nu}(\alpha x + \beta y) + \frac{\mu u}{\nu \mu}\right] + z, \gamma \frac{u}{\gamma} + z\right) = 1.$$

Используя выпуклую однородность, получим

$$E\left(\frac{\Theta[\alpha x + \beta y] + u}{\nu}, \frac{u}{\nu}\right) = 1, \quad (4)$$

но так как  $u, v \in J(e_1, \dots, e_{n+1})$ , то равенство (4) – это единственное разложение в свойстве  $n$ -мерности для элемента  $\alpha x + \beta y$ . Поэтому с учетом определения оператора  $A$  получим

$$A(\alpha x + \beta y) = \frac{\frac{v-u}{\nu}}{\frac{\Theta}{\nu}} = \frac{v-u}{\Theta}.$$

Сравним последнее равенство с ранее полученным:  $A(\alpha x + \beta y) = \alpha Ax + \beta Ay$ . Утверждение доказано.

Теперь можно перейти к доказательству основного факта.

**Т е о р е м а 1.** Для того, чтобы предикат  $E(x, y)$ , заданный на  $V \times V \subset \langle L, R \rangle \times \langle L, R \rangle$ , был линейным, необходимо и достаточно, чтобы он удовлетворял условиям 1)–8).

**Д о к а з а т е л ь с т в о. Необходимость.** Из замечаний, сделанных выше, следует, что для обоснования необходимости надо доказать выполнение свойства  $n$ -мерности для линейного предиката.

Поскольку  $\dim L > n$  и  $\text{aff } V = L$ , то можно зафиксировать линейно независимую систему векторов  $\{e_1, \dots, e_{n+1}\} \in V$  и не принадлежащую  $\ker F$  (ядру оператора  $F$ ). Зафиксируем такую и рассмотрим систему линейных уравнений для произвольного  $x \in V$  относительно неизвестных чисел  $\beta_1(x), \dots, \beta_{n+1}(x)$  вида

$$\begin{cases} f_j(x) = \sum_{i=1}^{n+1} \beta_i(x) f_j(e_i), j = \overline{1, n}, \\ \sum_{i=1}^{n+1} \beta_i(x) = 1. \end{cases} \quad (5)$$

Матрица системы  $A$  имеет вид

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ f_1(e_1) & f_1(e_2) & \dots & f_1(e_{n+1}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_n(e_1) & f_n(e_2) & \dots & f_n(e_{n+1}) \end{bmatrix}$$

Если показать, что определитель матрицы  $A$  не равен 0, то система (5) разрешима единственным образом и числа  $\beta_1(x), \dots, \beta_{n+1}(x)$  непрерывно зависят от  $x$ . Эквивалентными преобразованиями  $\det A$  можно привести

$$\det A = \begin{vmatrix} f_1(e_2 - e_1) \dots f_1(e_{n+1} - e_1) \\ f_n(e_2 - e_1) \dots f_n(e_{n+1} - e_1) \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Докажем теперь, что система векторов  $\{e_i - e_1\}_{i=2}^{n+1}$  линейно независима. Действительно, если она линейно зависима, то  $\sum_{i=2}^{n+1} \lambda_i (e_i - e_1) = 0$ , при  $\sum_{i=2}^{n+1} \lambda_i^2 \neq 0$ .

Но тогда  $\sum_{i=2}^{n+1} \lambda_i e_i + (-\sum_{i=1}^{n+1} \lambda_i) e_1 = 0$ , что означает

линейную зависимость первоначальной системы  $e_1, \dots, e_{n+1}$ . Противоречие. Следовательно, система  $\{e_i - e_1\}_{i=2}^{n+1}$  линейно независима и не принадлежит  $\text{Ker } F$ . Значит, определитель Грамма, стоящий в правой части равенства (6), не равен 0, что означает  $\det A \neq 0$ .

Теперь положим  $I(x) = \{i : \beta_i(x) \leq 0\}$ . Заметим, что множество  $I(x)$  может оказаться пустым. Затем положим

$$\alpha_0(x) = \left[ \sum_{i \in I(x)} \beta_i(x) \right]^{-1}, \alpha_i(x) = \alpha_0(x) \beta_i(x) > 0$$

при  $i \notin I(x)$  и  $\alpha_i(x) = -\alpha_0(x) \beta_i(x) \geq 0$  при  $i \in I(x)$ .

Рассмотрим элементы

$$\alpha_0(x) + \sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x) e_i \text{ и } \sum_{i \notin I(x)} \alpha_i(x) e_i.$$

Коэффициенты  $\alpha_0(x), \alpha_1(x), \dots, \alpha_{n+1}(x)$  положительны, найдем их сумму у каждого из элементов с учетом (4).

$$\begin{aligned} \alpha_0(x) + \sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x) &= \alpha_0(x) \left( 1 - \sum_{i \in I(x)} \beta_i(x) \right) = \\ &= \alpha_0(x) \sum_{i \notin I(x)} \beta_i(x) = 1, \end{aligned}$$

$$\sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x) = \alpha_0(x) \sum_{i \in I(x)} \beta_i(x) = 1.$$

Следовательно, элементы

$$\alpha_0(x)x + \sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x) e_i, \sum_{i \notin I(x)} \alpha_i(x) e_i \in V.$$

Теперь несколько преобразуем систему (4). Рассмотрим

$$\begin{aligned} f_j(x) &= \sum_{i=1}^{n+1} \beta_i(x) f_j(e_i) = \\ &= \sum_{i \in I(x)} \beta_i(x) f_j(e_i) + \sum_{i \notin I(x)} \beta_i(x) f_j(e_i) = \\ &= -\frac{1}{\alpha_0(x)} \sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x) f_j(e_i) + \frac{1}{\alpha_0(x)} \sum_{i \notin I(x)} \alpha_i(x) f_j(e_i), \end{aligned} \quad (7)$$

$j = \overline{1, n}$

С учетом линейности можно записать

$$f_j \left( \alpha_0(x)x + \sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x) e_i \right) = f_j \left( \sum_{i \notin I(x)} \alpha_i(x) e_i \right),$$

$j = \overline{1, n}$ .

Следовательно, система равенств (4) эквивалентна набору равенств (7). Поскольку

$$\alpha_0(x)x + \sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x) e_i, \sum_{i \notin I(x)} \alpha_i(x) e_i \in V,$$

то (6) для линейного предиката означает

$$E \left( \alpha_0(x)x + \sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x) e_i, \sum_{i \notin I(x)} \alpha_i(x) e_i \right) = 1.$$

Тем самым доказано свойство  $n$ -мерности и необходимость условий 1)–8)

*Достаточность.* Пусть предикат  $E(x, y)$  удовлетворяет свойствам (1–8). Сначала покажем, что  $E(x, y) = 1$  тогда и только тогда, когда

$$\alpha_i(x) = \alpha_i(y), i = \overline{0, n+1} \text{ и } I(x) = I(y).$$

Согласно условию рефлексивности

$$E(e_i, e_i) = 1, i = \overline{1, n+1},$$

тогда из утверждения (1) вытекает

$$E \left( \alpha_0(x)x + \sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x) e_i, \alpha_0(y)y + \sum_{i \in I(y)} \alpha_i(y) e_i \right) = 1.$$

С другой стороны,  $n$ -мерность означает

$$E \left( \alpha_0(x)x + \sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x) e_i, \sum_{i \notin I(x)} \alpha_i(x) e_i \right) = 1,$$

и из симметричности и транзитивности следует

$$E \left( \alpha_0(x)y + \sum_{i \in I(x)} \alpha_i(x) e_i, \sum_{i \notin I(x)} \alpha_i(x) e_i \right) = 1.$$

В силу однозначности  $\{\alpha_i(x)\}_{i=1}^{n+1}$  и  $I(x)$  можно утверждать, что  $\alpha_i(x) = \alpha_i(y), i = \overline{0, n+1}$  и  $I(x) = I(y)$ .

Эти рассуждения могут быть приведены и в обратном порядке, причем на последнем шаге следует воспользоваться второй частью утверждения (1).

Поскольку  $\{\alpha_i(x)\}_{i=0}^{n+1}$  однозначно связаны при помощи множества  $I(x)$  с  $\{\beta_i(x)\}_{i=1}^{n+1}$ , то  $E(x, y) = 1$  тогда и только тогда, когда  $\beta_i(x) = \beta_i(y), i = \overline{1, n+1}$ .

Покажем теперь, что для любых  $\alpha, \beta \geq 0, \alpha + \beta = 1$  и  $x, y \in V$  имеет место равенство

$$\beta_i(\alpha x + \beta y) = \alpha \beta_i(x) + \beta \beta_i(y), i = \overline{1, \dots, n+1}. \quad (8)$$

Действительно, так как  $Ax = \sum_{i=1}^{n+1} \beta_i(x) e_i$  (это вытекает из соотношений между  $\alpha_i(x)$  и  $\beta_i(x)$ ), то из утверждения 2 имеем

$$A(\alpha x + \beta y) = \alpha Ax + \beta Ay = \sum_{i=1}^{n+1} [\alpha \beta_i(x) + \beta \beta_i(y)] e_i.$$

С другой стороны,  $A(\alpha x + \beta y) = \sum_{i=1}^{n+1} \beta_i(\alpha x + \beta y) e_i$ .

В силу единственности разложения по линейно независимой системе  $e_1, \dots, e_{n+1}$  вектора  $A(\alpha x + \beta y)$  получим (8).

Теперь рассмотрим функционалы

$$g_i(x) = \beta_i(x) - \beta_i(0), k = \overline{1, n+1}.$$

Заметим, что так как от  $\beta_i(x)$  они отличаются только сдвигом, то  $E(x, y) = 1$  тогда и только тогда, когда

$$g_i(x) = g_i(y), i = \overline{1, n+1}.$$

Докажем их линейность. Действительно,

$$g_i(\lambda x) = \beta_i(\lambda x) - \beta_i(0) = \beta_i(\lambda x + (1 - \lambda)0) - \beta_i(0) = \lambda \beta_i(x) + (1 - \lambda) \beta_i(0) - \beta_i(0) = \lambda(\beta_i(x) - \beta_i(0)) = \lambda g_i(x),$$

$$\begin{aligned} g_i(x + y) &= g_i(x) \left[ \frac{2(x + y)}{2} \right] = 2g_i \left[ \frac{(x + y)}{2} \right] = \\ &= 2 \left[ \beta_i \left[ \frac{(x + y)}{2} \right] - \beta_i(0) \right] = 2 \left[ \frac{(\beta_i(x) + \beta_i(y))}{2} - \beta_i(0) \right] = \end{aligned}$$



$$= [\beta_i(x) - \beta_i(0)] + [\beta_i(y) - \beta_i(0)] = \\ = g_i(x) + g_i(y), i = \overline{1, n+1}.$$

Заметим, что все это выполняется в рамках выпуклого тела  $V$ . Однако, поскольку  $\beta_i(x)$  непрерывны, то  $g_i(x)$  непрерывны. Таким образом, с учетом однородности и аддитивности  $g_i(x)$  линейны на выпуклом теле  $V$ , для которого  $\text{aff } V = L$ . Поэтому по теореме о продолжении [1] они могут линейным образом быть продолжены на все пространство  $\langle L, R \rangle$ .

Нам осталось показать, что число функционалов можно сократить до  $n$ . Поскольку

$$\sum_{i=1}^{n+1} \beta_i(x) = 1, \text{ то } \beta_{n+1}(x) = 1 - \sum_{i=1}^n \beta_i(x).$$

Таким образом, можно обойтись первыми  $n$ -функционалами  $\beta_i(x)$ , а следовательно и  $g_i(x)$ .

Теперь зададимся вопросом: можно ли еще уменьшить это число?

Допустим,  $\beta_1(x)$  – «лишний». Тогда из рефлексивности и  $n$ -мерности для вектора  $e_1$  будем иметь:

$$E(e_1, e_1) = 1, \text{ т.е.}$$

$$\alpha_0(e_1) = 1, I(e_1) = 0, \alpha_1(e_1) = 1, \alpha_2(e_1) = \dots = \alpha_{n+1}(e_1) = 0.$$

Это означает, что  $\beta_1(e_1) = 1, \beta_i(e_1) = 0, i = \overline{2, n+1}$ . Значит,  $\beta_1(x)$  не является линейной комбинацией остальных. Аналогичное утверждение справедливо для  $\beta_i(x), i = \overline{2, n}$ . Тем самым теорема полностью доказана.

## Выводы

Рассмотрены ограничения, при которых ищутся условия существования линейных предикатов в гильбертовом пространстве. Показано, что последние могут носить различный характер. Всё зависит от конкретной реальной ситуации и той степени адекватности математической модели, которая нас устраивает. При этом положительный конус – это один из видов ограничений так как часто интенсивность входных сигналов реально ограничена сверху (например, яркость излучения). Естественно, этот случай требует другой модели входных сигналов. В работе эта модель выбрана в виде выпуклого тела гильбертового пространства. Найдены условия существования линейных предикатов, удовлетворяющие данному ограничению. Доказано, что они являются необходимыми и достаточными.

## Список литературы:

1. Мальцев А.И. Алгебраические системы - М.: Наука, 1970. – 392 с.
2. Каграманян А.Г., Четвериков Г.Г., Шляхов В.В. Мультиалгебраические дискретные системы при наличии алгебраической структуры носителя. Сообщение 1, 2 // Бионика интеллекта – 2016. – №2(87). – С. 48-58.
3. Grygoryy Chetverikov, Olexsey Puzik, Iryna Vechirska. Multily-valued structures of intellectual systems // Computer Science and Information Technologies (CSIT'2016), Lviv, 2016, ss. 204–207.

Поступила в редколлегию 15.02.2017

УДК 519.6



О.М. Литвин<sup>1</sup>, І.С. Томанова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Українська Інженерно-Педагогічна Академія, м. Харків, Україна

## ЧИСЕЛЬНЕ РОЗВ'ЯЗАННЯ БІГАРМОНІЧНОЇ ЗАДАЧІ ДЛЯ ВИПУКЛОГО БАГАТОКУТНИКА ЗА ДОПОМОГОЮ СПЛАЙНІВ П'ЯТОГО СТЕПЕНЯ НА ТРИКУТНІЙ СІТЦІ ВУЗЛІВ

В роботі наведені явні формули для знаходження всіх двадцяти одного параметру інтерполяційного поліному п'ятого степеня. Розглянуто використання явних формул для сплайнів 5-го степеня на трикутній сітці вузлів для розв'язання бігармонічної задачі для жорстко защемленої багатокутної випуклої пластини з рівномірним навантаженням. Наведено алгоритм побудови сплайнів п'ятого степеня для розв'язання бігармонічної задачі для жорстко защемленої пластини. Проведено серію обчислювальних експериментів для розбиття області дослідження на вісім та тридцять два трикутника. Результати проведених обчислювальних експериментів порівнюються з аналогічними результатами, отриманими за допомогою використання R-функцій, описаних в роботах Рвачова В.Л.

СПЛАЙНИ 5-ГО СТЕПЕНЯ, БІГАРМОНІЧНА ЗАДАЧА, ПЛАСТИНА СКЛАДНОЇ ФОРМИ, РІВНОМІРНО РОЗПОДІЛЕНЕ НАВАНТАЖЕННЯ, R-ФУНКЦІЇ, ВИПУКЛИЙ БАГАТОКУТНИК

### Вступ

Сплайни п'ятого степеня на трикутній сітці дають точну оцінку, але їх складно обчислювати, за рахунок того що для кожного трикутного елемента треба знаходити 21 коефіцієнт. У роботі [1] за допомогою явних формул, були побудовані сплайни 5-го степеня, які роблять обчислення значно простіше.

Теорія R-функції використовується при розв'язанні широкого класу задач, наприклад теорії пружності, теорії теплопровідності, машинній графіці та інших областях. R-функції описують границі складної області у вигляді єдиного аналітичного виразу. Застосування такого підходу вимагає значних обчислювальних витрат.

В основі структурних формул, що описують область, лежать побудовані за допомогою R-операцій функції. Які можуть мати складну структуру, а для обчислення інтегралів від них по області нестандартної форми необхідно використовувати квадратні формули з високим порядком точності.

У даній роботі основною метою є розробка та дослідження схеми метода скінченних елементів (МСЕ) для розв'язання задач про згин жорстко защемленої пластини у вигляді випуклого багатокутника з використанням явних формул для сплайнів п'ятого степеня запропонованих в роботі [1]. Проведено аналіз отриманого результату обчислювального експерименту і порівняння з відомими результатами знайденими з використанням R-функцій.

### 1. Аналіз останніх публікацій

В роботах [1, 2] було розглянуто метод побудови інтерполяційного поліном 5-го степеня

$$P_5(x, y) = \sum_{0 \leq |\beta| \leq 5} a_\beta x^{\beta_1} y^{\beta_2}, \quad |\beta| = \beta_1 + \beta_2, \quad \beta = (\beta_1, \beta_2)$$

та доведено вимоги

$$D^\alpha f(A_i) = D^\alpha P_5(A_i), \\ i = \overline{1, 3}, \quad 0 \leq |\alpha| \leq 2,$$

$$D^\alpha = \frac{\partial^{|\alpha|}}{\partial x^{\alpha_1} \partial y^{\alpha_2}}, \quad |\alpha| = \alpha_1 + \alpha_2, \quad \alpha = (\alpha_1, \alpha_2),$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial v_{ij}} \right|_{M_{ij}} = \left. \frac{\partial P_5}{\partial v_{ij}} \right|_{M_{ij}}, \quad (i, j) \in \{(1, 2), (2, 3), (3, 1)\},$$

де  $v_{ij}$  – нормаль до сторони, що з'єднує вершини

$A_i$  та  $A_j$ , точка  $M_{ij} = \left( \frac{x_i + x_j}{2}, \frac{y_i + y_j}{2} \right) = (x_{ij}, y_{ij})$  – середина цієї сторони. Ці умови є достатніми для

знаходження вказаних 21 коефіцієнта  $\alpha_\beta$ ,  $0 \leq |\beta| \leq 5$ .

Похідна по внутрішній нормалі  $v_{ij}$  визначається за формулою:

$$\frac{\partial f}{\partial v_{ij}} = \frac{\text{sign}(\Delta_{kij})}{|A_i, A_j|} \left[ (y_i - y_j) \frac{\partial f}{\partial x} - (x_i - x_j) \frac{\partial f}{\partial y} \right], \\ |A_i, A_j| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad \Delta_{kij} = \begin{vmatrix} x_k & y_k & 1 \\ x_i & y_i & 1 \\ x_j & y_j & 1 \end{vmatrix}.$$

В роботі [1] доведено, що функція:

$$h_{k\beta}(x, y) = \frac{(x - x_k)^{\beta_1} (y - y_k)^{\beta_2}}{\beta_1! \beta_2!} \omega_{ij}^3(x, y) \times \\ \times \left\{ \frac{1}{\omega_{ij}^3(x, y)} \right\}_{(x_k, y_k)}^{(2-|\beta|)},$$

де

$$\omega_{ij}(x, y) = \begin{vmatrix} x & y & 1 \\ x_i & y_i & 1 \\ x_j & y_j & 1 \end{vmatrix},$$

$$\{g(x, y)\}_{(x_k, y_k)}^{(m)} = \sum_{0 \leq |\gamma| \leq m} \left[ (D^\gamma g)(x_k, y_k) \times \right. \\ \left. \times \frac{(x - x_k)^{\gamma_1} (y - y_k)^{\gamma_2}}{\gamma_1! \gamma_2!} \right],$$

$$i, j, k \in \{1, 2, 3\}, \quad i \neq j \neq k,$$

має такі властивості

$$D^\alpha h_{k\beta} \Big|_{A_l} = \delta_{k,l} \delta_{\alpha,\beta}; \quad l, k \in \{1, 2, 3\}, \quad \delta_{\alpha,\beta} = \delta_{\alpha_1, \beta_1} \delta_{\alpha_2, \beta_2},$$

де  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

Також функція [1]:

$$H_{ij}(x,y) = \frac{\omega_{ik}^2(x,y)\omega_{jk}^2(x,y)\omega_{ij}(x,y)\text{sign}(\Delta_{kij})}{\omega_{ik}^2(x_{ij},y_{ij})\omega_{jk}^2(x_{ij},y_{ij})|A_i A_j|},$$

має властивості

$$D^\alpha H_{ij}|_{A_k} = 0, 0 \leq |\alpha| \leq 2, k \in \{1,2,3\}, k \neq i,j.$$

$$\frac{\partial H_{ij}}{\partial v_{ij}} = 1, \frac{\partial H_{ij}}{\partial v_{ij}}|_{M_{mn}} = 0, (i,j) \neq (m,n); (i,j), (m,n) \in Q$$

$$\omega_{ik}(x_i, y_i) = 0, \omega_{ik}(x_k, y_k) = 0$$

$$\omega_{ik}(x,y) = \begin{vmatrix} x-x_k & y-y_k & 0 \\ x_i-x_k & y_i-y_k & 0 \\ x_k & y_k & 1 \end{vmatrix}.$$

Для кожної функції  $f(x,y) \in C^2(T_{ijk})$  [1] оператор

$$S_5 f(x,y) = w(x,y) + \sum_{(i,j) \in Q} \left[ \frac{\partial f}{\partial v_{ij}} - \frac{\partial w}{\partial v_{ij}} \right]_{M_{ij}} H_{ij}(x,y)$$

$$w(x,y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{0 \leq |\beta| \leq 2} D^\beta f(A_i) h_{i\beta}(x,y)$$

$$D^\alpha S_{\partial} f|_{A_p} = D^\alpha f|_{A_p}, p \in \{1,2,3\},$$

$$0 \leq |\alpha| = \alpha_1 + \alpha_2 \leq 2$$

визначає поліном 5-го степеня із властивостями

$$\frac{\partial^\beta S_5 f}{\partial x^{\beta_1} \partial y^{\beta_2}}(A_{ij}) = \frac{\partial^\beta f}{\partial x^{\beta_1} \partial y^{\beta_2}}(A_{ij})$$

## 2. Формулювання бігармонічної задачі

Задача про згин та коливання жорстко защемлених пластин полягає в інтегруванні бігармонічного рівняння. Постановка задачі [2]

$$D(\Delta \Delta W) = f(x,y)$$

при крайових умовах

$$W|_{\partial G} = 0,$$

$$\frac{\partial W}{\partial x}|_{\partial G} = 0, \frac{\partial W}{\partial y}|_{\partial G} = 0.$$

Для обчислювального експерименту оберемо багатокутну область (рис. 1), яка за допомогою R-функцій записується у вигляді:

$$\psi(x,y) = f_1 \wedge f_2 \wedge f_3 \wedge f_4 \wedge f_5.$$

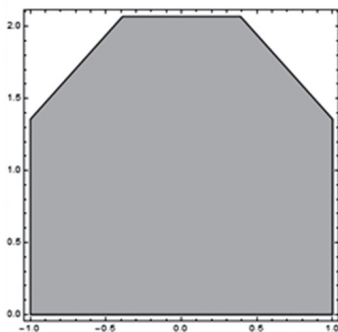


Рис. 1. Загальний вигляд пластини

В роботах [3, 4] була представлена структура розв'язку такої задачі у вигляді:

$$W = \psi^2 \Phi.$$

$$\Phi(x,y) \approx \sum_{i=1}^n a_i \Phi_i(x,y)$$

$\Phi_i(x,y)$  – координатні функції, які задовольняють крайовим умовам,  $a_i$  – невизначені коефіцієнти, які знаходяться з умови мінімуму відповідного функціоналу [4]:

$$I = \iint_{\Omega} ((\Delta W)^2 - 2Wf(x,y)) dx dy$$

Функції  $f_i, (i=1,2,3,4,5)$  визначаються наступними аналітичними виразами:

$$f_1 = \frac{-x(y_2 - y_1) + y(x_2 - x_1) - y_1 x_2 + x_1 y_2}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \geq 0,$$

$$f_2 = \frac{-x(y_3 - y_2) + y(x_3 - x_2) - y_2 x_3 + x_2 y_3}{\sqrt{(y_3 - y_2)^2 + (x_3 - x_2)^2}} \geq 0,$$

$$f_3 = \frac{-x(y_4 - y_3) + y(x_4 - x_3) - y_3 x_4 + x_3 y_4}{\sqrt{(y_4 - y_3)^2 + (x_4 - x_3)^2}} \geq 0,$$

$$f_4 = y \geq 0, f_5 = \frac{1-x^2}{2} \geq 0.$$

Розв'язок такої задачі з використанням R-функцій було отримано в роботі [4].

Максимальне значення наближеного розв'язку досягається в точці (0,1) та дорівнює 0,01875.

На рис. 2 наведено загальний вигляд та лінії рівня такого розв'язку.

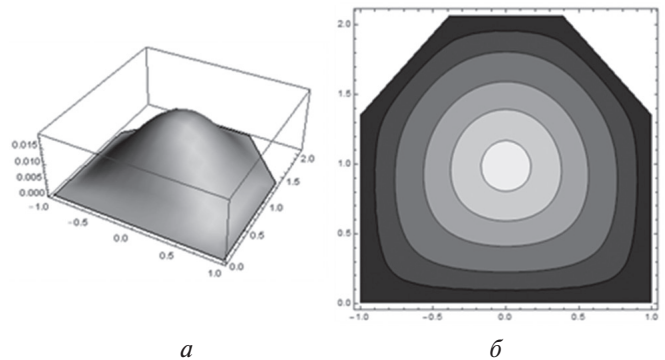


Рис. 2. Розв'язок бігармонічної задачі за допомогою R-функцій (а – графік розв'язку, б – лінії рівня)

## 3. Алгоритм побудови сплайнів 5-го степеня для розв'язання бігармонічної задачі для жорстко защемленої пластини

Наведемо алгоритм побудови сплайнів 5-го степеня для розв'язання бігармонічної задачі жорстко защемленої пластини на області  $G$ :

1. Розбиваємо область  $G$  на систему не вироджених трикутників, які задаються набором з трьох точок вигляду:  $(x_i, y_i), i = \overline{1, M}$ , які є вершинами трикутників розбиття області  $G$ . Трикутник  $T_{ijk}, i, j, k \in \{1, 2, \dots, M\}, i \neq j \neq k$ .

В результаті такого розбиття задана область  $G$  буде розбита на  $N$  трикутників.

2. Введемо лінійну нумерацію параметрів. Невідомі параметри  $c_k = (c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6)$ , які відповідають функціям базисних поліномів 5го степеня ввівши  $h_{0,0}, h_{1,0}, h_{0,1}, h_{2,0}, h_{1,1}, h_{0,2}$  відповідно, для кожної з вершин трикутників. Причому для вершин трикутників, які знаходяться в вершинах області  $G$  цей вектор матиме вигляд  $(0, 0, 0, 0, c_5, 0)$ , для вершин, які знаходяться на границях області  $G$ , паралельних осі  $Ox - (0, 0, 0, 0, c_5, c_6)$ , а для вершин, які знаходяться на границях області  $G$ , паралельних осі  $Oy - (0, 0, 0, c_4, c_5, 0)$  в силу граничних умов. Для інших вершин цей вектор матиме загальний вигляд  $(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6)$ .

3. Продовжуємо лінійну нумерацію для невідомих параметрів, які відповідають функціям базисних поліномів 5-го степеня при нормалях до середин сторін трикутників. Згідно з граничною умовою, якщо точка  $M_{ij} \in \partial G$ , то константу в цій точці покладемо рівній нулю.

В результаті пунктів 2 та 3 отримуємо набір з  $K$  невідомих параметрів.

4. Використавши поліноми отримані на трикутнику можна записати кусково-поліноміальну функцію, яка на кожному із трикутників розбиття матиме наступний вигляд:

$$S^{ijk}_5(x, y) = w(x, y) + \sum_{i=1}^3 \left( c_i - \frac{\partial w}{\partial v} \right) \Big|_{M_{ij}} \cdot H_{i,\beta}(x, y),$$

$$\text{де } w(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{0 \leq |\beta| \leq 2} c_{i,\beta} \cdot h_{i,\beta}(x, y).$$

5. Використовуємо отримані сплайни для знаходження інтегралів вигляду:

$$I_k = \int_{T_{ijk}} \left[ \left( \frac{\partial^2 S_k(x, y)}{\partial x^2} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial^2 S_k(x, y)}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 S_k(x, y)}{\partial y^2} \right)^2 - 2f(x, y) S_k(x, y) \right] dx dy$$

6. Запишемо функціонал  $I = I(c)$  вигляду:

$$I = \sum_{k=1}^N I_k$$

7. Мінімізуємо отриманий функціонал  $I$  за змінними  $c$ . За допомогою необхідної умови екстремуму, знаходимо оптимальні значення констант, розв'язавши наступну систему рівнянь:

$$\frac{\partial I}{\partial c_i} = 0, \quad i = \overline{1, K}$$

8. Підставляємо отримані значення у сплайн і отримуємо наближений розв'язок бігармонічного рівняння для жорстко защемленої пластини на області  $G$  відповідний заданому розбиттю на трикутники.

#### 4. Приклад розв'язання крайової задачі про згин пластини

Розв'язуємо задачу про згин жорстко защемленої багатокутної пластини. Результати всіх прикладів були отримані за допомогою системи комп'ютерної математики.

Приклад 1. Розбиття області на вісім трикутників.

Ділимо область  $G$  на вісім трикутників за схемою, наведеною на рис. 3.

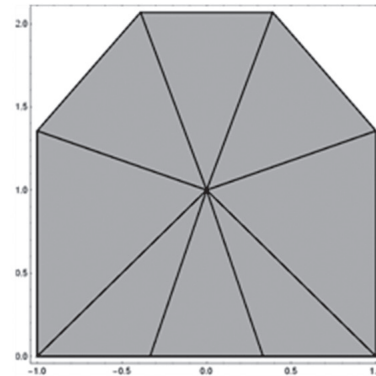


Рис. 3. Розбиття області на 8 трикутників

Згідно наведеного вище алгоритму розміщуємо невідомі параметри для сплайну. Для розбиття, наведеного на рис. 3, кількість невідомих параметрів дорівнюватиме 16.

Знаходимо поліном на кожному трикутнику. Інтегруємо отримані поліноми по кожному із трикутників та сумуємо отримані інтеграли.

Невідомі параметри знаходимо з умови мінімуму функціоналу  $I$ . Для цього розв'язуємо систему рівнянь вигляду:

$$\frac{\partial I}{\partial c_i} = 0, \quad i = \overline{1, 16}.$$

В результаті отримуємо наступний набір параметрів:

$$c_1 = 0.00584571, \quad c_2 = 0.153344, \quad c_3 = 0.0175757,$$

$$c_4 = -0.0738014, \quad c_5 = -0.000285686,$$

$$c_6 = -0.129018, \quad c_7 = 0.15346, \quad c_8 = -0.00560892,$$

$$c_9 = -0.00176131, \quad c_{10} = -0.0000245468,$$

$$c_{11} = -0.00180365, \quad c_{12} = -0.0000271036,$$

$$c_{13} = 0.0031394, \quad c_{14} = -0.00205704,$$

$$c_{15} = -0.00210907, \quad c_{16} = 0.00310447,$$

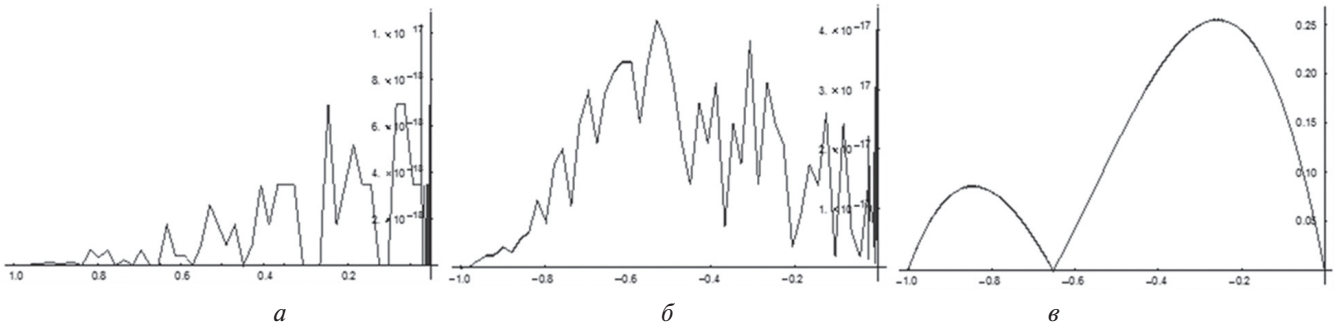
Підставляємо отримані константи в поліноми.

Перевірка показала, що сплайн є неперервним разом із своїми нормальними похідними першого порядку.

На рис. 4 наведені графіки різниць між першим та другим трикутником.

Різниця між ними мала порядок  $O(10^{-17})$  для різниці функцій,  $O(10^{-17})$  для різниці перших





**Рис. 4. Перевірка неперервності сплайнів на границі між трикутниками:**

*a* – модуль різниці між значеннями сплайнів, *б* – модуль різниці між першими похідними по нормалі від сплайнів, *в* – модуль різниці між другими похідними по нормалі від сплайнів

похідних по нормалі, що дозволяє нам стверджувати, що теоретичне твердження про належність сплайнів до класу  $C^1(G)$  виконується для побудованого наближеного розв'язку.

Максимальне значення наближеного розв'язку досягається в точці  $(0,1)$  та дорівнює  $0,01757$ .

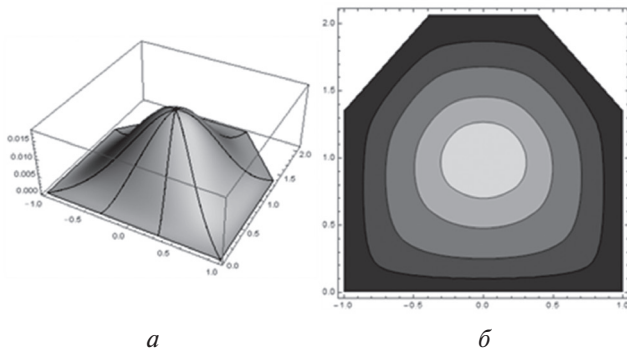
Різниця між наближеними розв'язками, отриманими за допомогою R-функцій та за допомогою сплайнів п'ятого степеня, становить  $0.00118$ .

Графік наближеного розв'язку у вигляді сплайну представлений на рис. 5.

Максимальна різниця між наближеним розв'язком, отриманим в роботі В.Л. Рвачова, та наближеним розв'язком-сплайном становить  $0,000118$ .

Графік наближеного розв'язку у вигляді сплайну наведений на рис. 7.

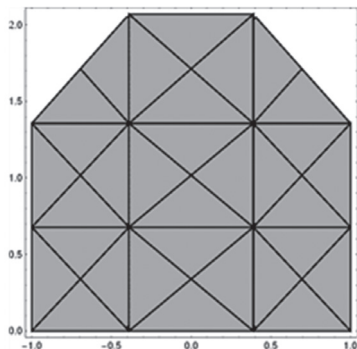
Порівнюючи розв'язки знайдено максимальне значення похибки взявши крок  $0,01$  по всій області. Максимальна різниця між наближеним розв'язком, отриманим за допомогою R-функцій В.Л. Рвачова та отриманим наближеним розв'язком-сплайном становить  $0,001185$ .



**Рис. 5. Графік наближеного розв'язку бігармонічної задачі за допомогою сплайнів 5-го степеня при розбитті на 8 трикутників**  
(*a* – графік розв'язку, *б* – лінії рівня)

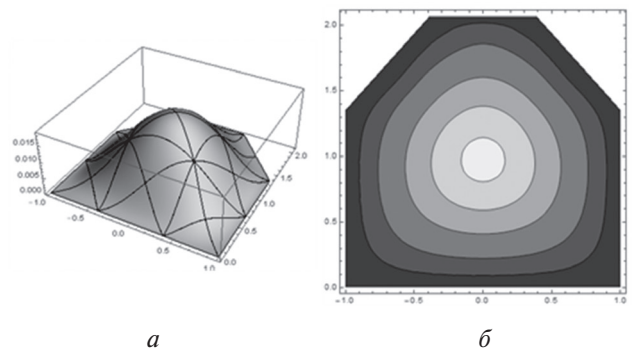
Приклад 2. Розбиття області на тридцять два трикутника.

Ділимо область  $G$  на тридцять два трикутника за схемою, наведеною на рис. 6.



**Рис. 6. Розбиття області на 32 трикутника**

Максимальне значення наближеного розв'язку досягається в точці  $(0,1)$  та дорівнює  $0,01859$ .



**Рис. 7. Графік наближеного розв'язку бігармонічної задачі за допомогою сплайнів 5-го степеня при розбитті на 32 трикутників**  
(*a* – графік розв'язку, *б* – лінії рівня)

Результати проведених обчислювальних експериментів та їх порівняння із розв'язком, отриманим за допомогою R-функцій В.Л. Рвачова наведені у табл. 1.

### Висновки

В роботі запропоновано схема розв'язання бігармонічної задачі для багатокутної випуклої пластини у випадку граничних умов, які відповідають умовам жорсткого защемлення пластини у вигляді сплайна 5го степеня, який забезпечує належність наближеного розв'язку класу  $C^1(G)$ .

Сплайни п'ятого степеня дають більш точну оцінку, але вони рідше застосовуються у зв'язку зі складністю обчислення. Вперше було запропоновані формули для побудови полінома п'ятого степеня у роботі [1]. Це дало можливість застосувати поліноми для бігармонічної задачі, які не застосовувалися раніше.

Результати проведення обчислювального експерименту

Кількість елементів	Кількість невідомих коефіцієнтів	Значення в центрі наближеного розв'язку за допомогою R-функцій	Значення в центрі наближеного розв'язку	Максимальна похибка $\max_{(x,y) \in G}  S_R(x,y) - S_5(x,y) $
8	16	0,01875	0.01757	0.00118
32	115		0.01859	0.000118

Був проведений експеримент, який порівнює наближений розв'язок, отриманий за допомогою R-функцій із поліномами, які були отримані за допомогою явних формул для сплайнів п'ятого степеня [1] на багатокутній області. В якості наближеного розв'язку з яким порівнювали отриманні дані був взятий розв'язок з роботи [3]. Область була розбита на вісім та тридцять два трикутника. При збільшенні трикутників розбиття спостерігається зменшення похибки.

#### Список літератури:

1. Сергиенко, И.В. Явные формулы для интерполяционных сплайнов 5-й степени на треугольнике / И.В Сергиенко, О.Н.Литвин, О.О. Литвин, О.И. Денисова. – Кибернетика и системный анализ. – 2014. – Том 50, № 5. – С. 17–33.
2. Zlamal, M. Mathematical aspect of the finite element method / M. Zlamal, A. Zenisek, V. Kolar, J. Kratochvil // Technical physical and mathematical principles of the finite element method. – 1971. – P.15–39.
3. Рвачев В.Л., Курпа Л.В., Склепус Н.Г, Учишвили Л.А. Метод R-функций в задачах об изгибе и колебаниях пластин сложной формы – Киев: Наук. думка, 1973. – 121 с.
4. Рвачев В.Л. R-функции в задачах теории пластин / В.Л Рвачев, Л.В. Курпа. – Киев: Наук. думка, 1987. – 176 с.

Надійшла до редколегії 14.03.2017.

УДК 519.853:005



Г.Г. Асеев

Харьковская академия культуры, г. Харьков, Украина  
gaseyev@ic.ac.kharkov.ua

## ОПТИМАЛЬНЫЕ ПО ПАРЕТО РЕШЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ И ЛОГИСТИКИ

Описан метод решения гладких нелинейных задач многокритериальной оптимизации с ограничениями, позволяющий восстанавливать весь Парето-фронт, учитывающих критерии управления производством (задачи управления издержками, прибылью, минимальных расходах энергоресурсов, сырья, комплектующих и т. д.) и критериев управления звеньев в цепях поставок логистики (задачи выбора способа поставки товара, выбора места дислокации склада, оптимизации решений при управлении рисками, оптимизации решений при управлении запасами и т.д.).

ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТООБОРОТ, ОПТИМИЗАЦИЯ, ПАРЕТО-МНОЖЕСТВО, ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ, МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАДАЧА, НАПРАВЛЕНИЕ НАЙСКОРЕЙШЕГО СПУСКА, ЭКСТРЕМУМ

### Введение

В работе [1] описан ряд методов поиска Парето оптимального решения многокритериальной оптимизации в электронном документообороте для задач управления издержками, прибылью, минимальных расходах энергоресурсов, сырья и т. д., но вопросы оптимизации решений в логистике, с учетом этих задач, не рассматривались. В центре методологии оптимизации решений в логистике находится операция количественного / качественного сравнения альтернатив для выбора одной, подлежащей реализации. Поэтому, используемые в рамках такого анализа оценки являются многопараметрическими, чтобы более полно отображать основные свойства альтернатив, включая конечный экономический результат, стоимость, издержек, эффективность, риск, цепи поставок и т.д.

Поэтому в формате задач выбора наилучших решений для систем логистики, сегодня требуется учитывать требования многокритериальности рассматриваемых задач оптимизации управления производством.

**Оптимизации многокритериальных решений в логистике.** Практические задачи системного анализа в логистике нередко соотносятся с ситуациями, когда для нахождения оптимального решения требуется учитывать одновременно ряд целей или критериев (например, максимизировать рентабельность, качество, надежность и т.д. минимизация стоимости, издержек и т.п.), которые обозначим как критерии управления производством. Стремительное развитие логистики, которое наблюдается в последнее время, отчетливо проявляет следующий атрибут задач такого типа в указанной области исследований. В полной мере это относится к задачам управления цепями поставок. В частности, к ним относятся задачи, которые формулируются как задачи выбора способа поставки товара, выбора места дислокации склада, оптимизации решений при управлении рисками, оптимизации решений при управлении запасами и т.д.

Постановки таких задач обуславливаются необходимостью оптимизации решений при нескольких критериях одновременно [2].

Указанная особенность заранее предусматривается в формате методов многокритериальной оптимизации. Менеджер может реализовать ее, например, задавая конкретный критерий выбора с учетом его линий уровня.

В [3] подчеркивается, что понятие цепи поставок в словаре ANNEX (Terminology in Logistics. ANNEX Dictionary. European Logistics Association) трактуется, по существу, как «интеграция основных функциональных сфер бизнеса (логистических функций) компании и ее партнеров». При этом понятие управления цепями поставок (SCM – supply chain management), как отмечено в [4], – «это высокоинтерактивный, комплексный и системный подход, который требует одновременного рассмотрения и учета многих актов обмена». Таким образом, при решении соответствующих задач управления в цепях поставок приходится иметь дело с ситуациями, когда нахождение оптимального решения в рамках, например, анализируемого звена / звеньев цепи поставок осложняется необходимостью одновременной оптимизации целого ряда показателей (имеется в виду критериев управления производством).

В таких ситуациях от менеджера требуется умение находить наилучшие (в рамках заданной области допустимых анализируемых альтернатив) решения. Учитывая подчеркнутые выше особенности, понятно, что это – не простая задача для менеджера. Из-за указанной специфики задач оптимизации при многих критериях требуется находить для любого из следующих случаев.

1. Имеющиеся критерии в рамках задачи оптимального управления в цепи поставок формализованы в виде конкретных критериальных функций, причем сама задача управления также формализована как соответствующая задача многокритериальной оптимизации.

2. Имеющиеся критерии не удается формализовать в виде конкретных критериальных функций, но, тем не менее, лицо, принимающее решения (ЛПР) может задать свои предпочтения на основе попарного сравнения как самих критериев (между собой), так имеющихся альтернатив с позиций каждого из критериев [2].

Применительно к любому из указанных случаев существуют свои специальные методы, приемы и подходы для нахождения оптимальных или наилучших решений (такие решения также называют компромиссными). А именно, применительно к первому из указанных случаев – это методы решения задач многокритериальной оптимизации, а применительно ко второму – например, метод аналитической иерархии (процессы аналитической иерархии). В формате таких подходов используются методы и приемы сведения многокритериальных задач к решению задач скалярной оптимизации [2].

**1. Постановка задачи оптимизации**

В [4] подчеркнута, что «управление цепочками поставок есть управление восемью ключевыми бизнес-процессами: взаимоотношениями с потребителями; обслуживанием потребителей; спросом; выполнением заказов; производственным потоком; снабжением; разработкой продукции и доведением ее до коммерческого использования; возвратными потоками». Каждый из указанных процессов характеризуется своими атрибутами и показателями. Будем рассматривать два вида критериев. Пусть уже выделено  $M$  критериев, формализующих издержки или потери применительно к указанным выше процессам. Такие исходно заданные критерии являются критериями управления производством (чтобы отличать их от критерия выбора, на основе которого затем будет найдено оптимальное решение в формате задачи многокритериальной оптимизации и для задач логистики). Обозначим указанные критерии управления производством следующим образом:

$$d^{(t)}(y), t=1,2,\dots, M, \text{ при ограничениях } y \in Y \leq 0,$$

где  $d^{(t)}(y)$  — некоторая функция  $t$  переменных (при фиксированном значении  $t$ ), формализуемая в качестве критериев управления производством;  $y$  — переменная, координаты которой представляют управляемые параметры для задачи многокритериальной оптимизации в рамках ограничений  $y \in Y$ , формализуемая в качестве критерия управления производством  $y = (y_1, y_2, \dots, y_M)$ . Множество всех допустимых точек обозначим:

$$\Omega_d = \{y | d^{(t)}(y) \leq 0.\}$$

Для организации оптимального управления в рамках анализируемого звена (звеньев) цепи поставок системы логистики менеджеру потребуется задать определенные критерии, обуславливаемые

желанием оптимизировать указанные показатели. Обозначим критерии в формате задачи многокритериальной оптимизации для задач логистики :

$$g^{(k)}(x), k=1,2,\dots, N, \text{ при ограничениях } x \in X \leq 0,$$

где  $g^{(k)}(x)$  — некоторая функция  $n$  переменных (при фиксированном значении  $k$ ), формализуемая в качестве критериев звена / звеньев цепи поставок;  $x$  — переменная, координаты которой представляют управляемые параметры звена/звеньев цепи поставок для задачи многокритериальной оптимизации в рамках ограничений  $x \in X$ , анализируемого критерия  $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ . Множество всех допустимых точек обозначим:

$$\Omega_g = \{x | g^{(k)}(x) \leq 0.\}$$

Задача многокритериальной оптимизации рассматривается как задача одновременной оптимизации критериев  $d^{(t)}(y)$  и  $g^{(k)}(x)$ . Требуется найти точки  $y \in Y \leq 0$  и  $x \in X \leq 0$ , которые, в некотором смысле (будут уточняться) минимизируют все эти критерии. Другими словами, рассматривается следующая оптимизационная задача:

$$\left[ d^{(t)}(y) + g^{(k)}(x) \right] \rightarrow \min, t = \overline{1, M}, k = \overline{1, N}, y \in \Omega_d, x \in \Omega_g,$$

при условии  $y \in Y$  и  $x \in X$ . Этот суммарный критерий и подлежит оптимизации (по каждой отдельной или частной компоненте):

$$\left[ d^{(t)}(y) + g^{(k)}(x) \right] \rightarrow \min = \left\langle d^{(1)}(y) + d^{(2)}(y) + \dots + d^{(M)}(y) + g^{(1)}(x) + g^{(2)}(x) + \dots + g^{(N)}(x) \right\rangle \rightarrow \min, \quad (1) y \in \Omega_d, x \in \Omega_g.$$

В общем случае  $Y \cap X$  и  $\Omega_d \cap \Omega_g$ . Идеальной ситуацией при решении задач многокритериальной оптимизации является случай, когда пересечение множеств оптимальных решений для всех критериев не является пустым. Такие множества обозначим следующим образом:

$$Y \cap X = \bigcap_{t=1}^M \left\langle \arg \min_{y \in \Omega_d} d^{(t)} \times \{y | y \in Y \wedge y \in X\} \right\rangle + \bigcap_{k=1}^N \left\langle \arg \min_{x \in \Omega_g} g^{(k)} \{x | x \in X \wedge x \in Y\} \right\rangle.$$

Если указанные множества не являются пустыми, то принадлежащие им альтернативы называются *абсолютными* решениями. В практических ситуациях при оптимизации работы параметров критериев управления производством и звена цепи поставок для конкретной системы логистики одни частные критерии могут противоречить другим. Следовательно, нужно искать компромиссное решение, наилучшее в некотором смысле



оптимальным Парето решением. Как правило, такое компромиссное решение стараются найти в классе так называемых эффективных решений (их также называют эффективными по Парето решениями, или просто множеством Парето).

### 2. Парето-оптимальные решения

Приведем соответствующее формальное определение. Решения  $y^* \in Y \{y^* | y^* \in Y \wedge x^* \in X\}$  и  $x^* \in X \{x^* | x^* \in X \wedge y^* \in Y\}$  называется *эффективным решением* или *оптимальным по Парето решением*, если не существует другого решения  $y \in Y$  и  $x \in X$  ( $Y \cap X$ ) среди анализируемых альтернатив, такого, что  $d^{(t)}(y) \leq d^{(t)}(y^*)$ ,  $t = \overline{1, M}$  и  $g^{(k)}(x) \leq g^{(k)}(x^*)$ ,  $k = \overline{1, N}$ , причем хотя бы для одного  $t$  и  $k$  имеет место строгое неравенство. Другими словами, оптимальные по Парето решения  $y^* \in Y$  и  $x^* \in X$  должны обладать следующим свойством. Во множествах  $Y$  и  $X$  допустимых альтернативных решений не найдется ни одного другого решения, переход к которому (от  $y^*$  и  $x^*$ ) позволит улучшить показатель хотя бы одного из критериев  $d^{(t)}(y)$  или  $g^{(k)}(x)$ , чтобы при этом не ухудшились бы показатели других частных критериев. Если множество абсолютных решений не является пустым, то множество оптимальных по Парето решений совпадает с множеством абсолютных решений.

### 3. Методы нахождения Парето-оптимальных решений

Нам необходимо найти экстремум (или экстремумы) целевой функции (1)  $(\Omega_d + \Omega_g)$  в большей части нелинейных переменных  $y(t)$  и  $x(k)$  (проектных параметров). Такая функция описывает  $n$ -мерную поверхность. Существующие на настоящее время методы нелинейного программирования не в состоянии найти глобальный минимум хотя бы из-за того, что зачастую значения производных, применяемых в этих методах, ничего не говорят об оптимальности текущей точки [1]. Некоторые существующие вычислительные методы позволяют свести поиска глобального минимума  $n$ -мерной поверхности к последовательному поиску экстремума одномерных задач, а такой результат уже является множеством оптимальных по Парето решений. Напомним, что одномерная задача описывает определенную кривую на плоскости.

Для упрощения изложения последующего материала введем некоторые переобозначения. Введем функцию  $F(z)$ , в которой  $z \in Y \{z | z \in Y \wedge z \in X\}$  и  $z \in X \{z | z \in X \wedge z \in Y\}$ . Далее в одномерной задаче найдем *направление наискорейшего спуска* и *выбор длины шага*.

#### 3.1. Направление наискорейшего спуска

Требуется найти минимум функции  $F(z)$ . Начиная с заданной точки  $z_0$ , будем генерировать

последовательность точек  $z_{n+1}(z_n)$  таких, что  $F(z_{n+1}) < F(z_n)$ .

Пусть  $z_{n+1} = z_n + \alpha v$ , где  $v$  — коэффициент направления, а  $\alpha$  — длина шага. Вычислим  $v$ . Из теоремы Тейлора следует:

$$F(z_n + \alpha v) = F(z_n) + \alpha v^T \nabla F(z_n) + o(|v|).$$

То, насколько изменится  $F$  вдоль направления  $v$ , зависит от произведения  $v^T \nabla F(z_n)$ . Получаем следующую задачу:

$$\min v^T \nabla F(z_n) \tag{2}$$

при условии  $|v| = 1$ .

Поскольку

$$\nabla F(z_n) = |v| |\nabla F(z_n)| \cos \theta = |\nabla F(z_n)| \cos \theta,$$

то минимум (2) достигается при  $\theta = \pi$  и  $\cos \theta = -1$ . Таким образом, получаем:

$$v = - \frac{\nabla F_n}{|\nabla F_n|}$$

— *направление наискорейшего спуска*.

Вообще, любое направление, отличающееся от  $-\nabla F_n$  меньше, чем на  $\pi/2$  является направлением спуска, т.е. приводит к уменьшению  $F$  при достаточно малых  $\alpha$ . При  $\nabla F_n = 0$  такого направления не существует,  $z_n$  является минимумом функции  $F$ .

Необходимое условие локального экстремума функции  $F$ : если  $z_n$  — локальный экстремум, то  $\nabla F_n = 0$ .

#### 3.2. Выбор длины шага

Оптимальное значение длины шага  $\alpha$  — это решение следующей одномерной задачи:

$$\min_{\alpha} F(z_n + \alpha v), \quad \alpha > 0. \tag{3}$$

Однако, точное решение задачи (3) требует большого количества вычислений целевой функции. На практике применяют другой подход: подбирают такие значения  $\alpha$ , чтобы они удовлетворяли некоторым условиям. Вот пример таких условий (правила Вулфа [5]):

$$F(z_n + \alpha v) \leq F(z_n) + c_1 \alpha \nabla F_n^T v, \tag{4}$$

$$F(z_n + \alpha v)^T v \geq c_2 \alpha \nabla F_n^T v, \tag{5}$$

где  $0 < c_1 < c_2 < 1$ .

Введем обозначение  $\phi(\alpha) = F(z_n + \alpha v)$ . Первое условие (4) (также известное как правило Армихо) говорит о том, что  $\phi(\alpha)$  не должна превышать значения некоторой убывающей линейной функции, равной  $F(z_n)$  в нуле. Это условие удовлетворяется для всех достаточно малых  $\alpha$ . Второе условие (5) означает, что производная  $\phi'(\alpha)$  по крайней мере в  $c_2$  раз больше, чем  $\phi'(0)$ .

В многокритериальном случае условие (5) не работает, поскольку значения производных отдельных компонент ничего не говорят об оптимальности текущей точки. Правило Армихо можно расширить на многокритериальный случай: неравенство (4) следует понимать покомпонентно. Процедура поиска  $\alpha$  формулируется так: начиная

с  $\alpha = 1$ , пока неравенство (4) не выполнится, полагаем  $\alpha := \alpha/2$ .

**3.3. Рекомендуемые методы поиска экстремума**

Метод координатного спуска. Фиксируем  $t$  в  $d^{(t)}(y)$  и  $k$  в  $g^{(k)}(x)$ . Метод заключается в поочередном поиске минимума по координате  $z_1$ , затем  $z_2$  и т. д. После нахождения точки минимума по координате  $z_1$  переходим к нахождению точки минимума по координате  $z_2$  и т. д. Используются направления наискорейшего спуска, описанного в 3.1 и выбор длины шага, описанного в 3.2. Поиск ведется с одинаковым шагом, который уменьшается после нахождения всех значений  $\tilde{z}_{1m}, \tilde{z}_{2m}, \dots, \tilde{z}_{nm}$ . Таким образом, алгоритм реализации этого метода подобен алгоритму метода поразрядного приближения и лишь дополняется циклом задания переменных  $z_1, z_2, \dots, z_n$ , внутри которого оценивается погрешность нахождения  $z_{im}$  для каждой переменной. Нахождение точек минимума ведется в поле переменных  $t = \overline{1, M}, k = \overline{1, N}$ . Таким образом мы получаем множество оптимальных по Парето решения.

Метод спирального координатного спуска отличается от рассмотренного выше лишь тем, что шаг  $\alpha$  меняется каждый раз при переходе от поиска минимума по одной переменной к поиску минимума по другой переменной. В трехмерном пространстве это напоминает спуск во впадину по спирали. Обычно этот метод дает некоторое сокращение времени поиска.

Применяются и другие методы поиска экстремума функций одной переменной: метод равномерного поиска, метод поразрядного приближения, метод золотого сечения, метод квадратичной интерполяции – экстраполяции и др. Применение того или другого метода зависит от сложности рассматриваемой задачи.

Так как множество альтернативных решений является дискретным, то задачу выбора оптимального решения по многим критериям удобно представлять в матричной форме. При этом каждую альтернативу достаточно характеризовать оценками частных критериев. По строкам матрицы  $i$  представляют альтернативы  $Z_{ij}$ , и где  $j$  – столбцы такой матрицы, в которой указываются оценки по конкретному частному критерию  $d^{(t)}(y)$  и  $g^{(k)}(x)$ . В качестве иллюстрации рассмотрим следующий пример.

**ПРИМЕР.** Требуется выбрать наилучший вариант организации управления производством и звеньев цепи поставок товара, например, из семи доступных и возможных вариантов. Соответствующие варианты альтернатив обозначаем далее через  $Z_{ij}$ , где  $i = 1, 2, \dots, 7$ , а  $j = 1, 2, \dots, 4$ . Пусть частные критерии в этой ситуации представлены четырьмя критериями. В качестве них критериев могут выступать, например, следующие. Критерий  $d^{(1)}$  – минимизация расходов на энергоресурсы для изготовления товара; критерий

$d^{(2)}$  – минимизация различных издержек на производственные потоки и различные потери; критерий  $g^{(3)}$  – минимизация оценки годовых издержек, обусловливаемых соответствующими затратами на перевозки; критерий  $g^{(4)}$  – минимизация оценки годовых издержек, обусловливаемых соответствующими затратами на хранение (ограничимся в этом примере перечисленными четырьмя частными критериями). Для наглядности представим эти данные в виде матрицы и уточним, какие из альтернатив являются оптимальными по Парето.

**РЕШЕНИЕ.** Альтернатива  $Z_2$  доминирует альтернативу  $Z_4$  (т.к. переход от альтернативы  $Z_2$  к альтернативе  $Z_4$  позволяет улучшить показатели частных критериев  $d^{(1)}$  и  $g^{(3)}$ , не ухудшив показатели остальных частных критериев).

Альтернативы	Значения частных критериев			
	$d^{(1)}$	$d^{(2)}$	$g^{(3)}$	$g^{(4)}$
$Z_1$	90	54	318	58
$Z_2$	80	68	246	56
$Z_3$	84	70	252	48
$Z_4$	82	68	340	56
$Z_5$	90	70	292	52
$Z_6$	86	64	294	54
$Z_7$	84	72	244	50

Другими словами, вариант  $Z_2$  является заведомо лучшим (по заданным частным критериям), чем вариант  $Z_4$ . Никакой менеджер никогда в такой ситуации не выберет альтернативу  $Z_4$  в качестве наилучшей. Она не является оптимальной по Парето. Аналогично альтернатива  $Z_3$  доминирует альтернативу  $Z_5$ . Действительно, переход от альтернативы  $Z_5$  к альтернативе  $Z_3$  позволяет улучшить показатели частных критериев  $d^{(1)}$ ,  $g^{(3)}$  и  $g^{(4)}$ , не ухудшив показатели  $d^{(2)}$ . Таким образом, никакой менеджер или ЛПР никогда в такой ситуации не выберет также и альтернативу  $Z_5$  в качестве наилучшей. Обусловлено это именно тем обстоятельством, что альтернатива  $Z_5$  не является оптимальной по Парето.

В рассматриваемом примере альтернативные варианты решений  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_6$  и  $Z_7$  являются оптимальными по Парето. При переходе от любого из этих вариантов решений к какому-нибудь другому (из множества альтернатив  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_6$  и  $Z_7$ ) нельзя улучшить показатель хотя бы одного из частных критериев, не ухудшив при этом показатель / показатели какого-нибудь из остальных частных критериев.

**ЗАМЕЧАНИЕ.** Несмотря на то, что разные ЛПР могут иметь и разные предпочтения (и соответственно выбирать в качестве оптимальных решений разные альтернативы), тем не менее, в

формате процедур их выбора всегда будет общим следующее. Любое ЛПР *всегда будет выбирать оптимальное решение именно из множества решений оптимальных по Парето*. Кроме того, как видим, при этом нельзя однозначно сказать, какое из них лучше. Выбор может зависеть от предпочтений ЛПР.

### Выводы

В системах электронного документооборота до настоящего времени применяются различные критерии управления производством (максимальная рентабельность, качество, надежность и т.д. минимизация стоимости, издержек, затрат электроэнергии и т.п.). В то же время в задачах логистики используются критерии, которые формулируются как задачи управления цепями поставок (такие как доставка сырья, комплектующих и т. п.), выбора способа поставки товара, выбора места дислокации склада, оптимизации решений при управлении рисками, оптимизации решений при управлении запасами и т.д. Предметные области критериев управления производством и логистических направлений значительно пересекаются, зависят одна от другой и это обуславливает рассматривать при оптимизации как совместное решение многокритериальных уравнений большой

размерности. Существующие методы прикладного нелинейного программирования не справляются с нахождением минимума таких целевых функций.

Предложенные в работе методы сведения многомерных задач к последовательному применению поочередного поиска минимума по каждой координате хорошо показали себя на практике. В результате решения находится множество оптимальных по Парето решений, которые удобно анализировать менеджеру или ЛПР.

### Список литературы:

1. *Асеев Г.Г.* Совершенствование метода многокритериальной оптимизации в электронном документообороте, основанного на локальной геометрии множества Парето / Г.Г. Асеев // Бионика интеллекта. – 2015, № 2(85). С. 58-61.
2. *Бродецкий Г.Л.* Методы оптимизации многокритериальных решений в логистике / Г.Л. Бродецкий – М.: ИНФРА, 2009. – 230 с.
3. *Сергеев В.И.* Корпоративная логистика. 300 ответов на вопросы профессионалов / В.И. Сергеев – М.: ИНФРА – 2004. – 976 с.
4. *Сток Д.Р.* Стратегическое управление логистикой / Д.Р.Сток, Д.М. Ламберт – М.: ИНФРА – 2005. 797 с.
5. *Wolfe P.* Convergence conditions for ascent methods / P. Wolfe // Siam Review. - 2010. № 11(2). Pp. 226-235.

*Поступила в редколлегию 23.03.2017*

УДК 517.95 : 517.988

О.С. Кончаковская<sup>1</sup>, М.В. Сидоров<sup>2</sup><sup>1</sup> ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, oksana.konchakovska@nure.ua<sup>2</sup> ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, maxim.sidorov@nure.ua

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА В МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Проводится сравнительный анализ расчета микроэлектромеханической системы в двух областях (круговой и прямоугольной формы). Математической моделью такой системы является нелинейная краевая задача для эллиптического уравнения. Приближенное решение задачи предлагается искать с помощью двусторонних приближений, которые построены с использованием методов нелинейного анализа в полуупорядоченных пространствах. Эффективность разработанного численного метода иллюстрируется серией вычислительных экспериментов.

МЕТОД ДВУСТОРОННИХ ПРИБЛИЖЕНИЙ, КОНУСНЫЙ ОТРЕЗОК, ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ, НЕЛИНЕЙНАЯ КРАЕВАЯ ЗАДАЧА, ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

### Введение

Одним из наиболее бурно развивающихся научно-технических направлений, реализуемых на микро-уровне, является микросистемная техника (МСТ). В зависимости от сферы применения МСТ выделяют микрооптоэлектромеханические, микроакустоэлектромеханические, микроэлектромеханические (МЭМС) и другие системы. Создаваемые микроустройства находят широкое применение в различных областях науки и техники, в частности, в авиации, автомобилестроении, телекоммуникациях, робототехнике [1]. Для описания физических процессов в таких системах используют методы математического моделирования.

Для расчета наиболее точных и сложных моделей основными методами являются численные методы, требующие проведения большого объема вычислений на ЭВМ. Наиболее удачные численные методы дают возможность получить итерационную последовательность с двусторонней сходимостью. Такие методы позволяют апостериорно на каждой итерации оценить погрешность приближенного решения.

Таким образом, разработка и совершенствование средств математического моделирования и численного анализа задач, возникающих при проектировании МСТ, с использованием методов с указанными свойствами, является актуальной научной задачей.

В работе рассмотрена проблема математического моделирования и численного анализа первой краевой задачи для нелинейного эллиптического уравнения второго порядка. Эта задача служит математической моделью работы упрощенного электростатического микросистемного устройства. Для решения задачи предлагается применить метод последовательных приближений с двусторонним характером сходимости к приближенному решению задачи.

Целью данного исследования является разработка и программная реализация метода численного анализа задачи математического моделирования процессов в простейших микроэлектромеханических устройствах и сравнительный анализ полученных результатов для двух областей: круговой и прямоугольной формы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- поставить задачу математического моделирования и численного анализа процессов в простейшем МЭМС устройстве;
- разработать метод решения задачи;
- провести вычислительные эксперименты в двух областях для различных параметров модели;
- провести анализ адекватности решения;
- сравнить полученные результаты между собой.

Настоящая работа продолжает исследования, начатые в [2].

### 1. Постановка задачи

Важнейшей составной частью большинства МЭМС является микроактюатор, который преобразует энергию в движение тепловым, электростатическим, магнитным, пьезоэлектрическим или гидравлическим методами. Электростатическая активация как наиболее общий и хорошо разработанный метод применяется примерно в одной трети микроактюаторов, причем главные его достоинства – минимальные энерго- и массоемкость [1]. Электростатический актюатор состоит из упругой диэлектрической мембраны, которая покрыта тонкой металлизированной пленкой (подвижный электрод) и проводящей электрический ток жесткой пластины (неподвижный электрод).

Принцип действия данных актюаторов основан на возникновении электростатической силы между двумя электродами (рис. 1). Под действием отклоняющего напряжения (pull-in voltage) подвижный электрод притягивается к неподвижному, вследствие чего может произойти слипание электродов.



Обратный процесс называется устойчивым состоянием системы. Таким образом, необходимо определить максимальный прогиб мембраны при заданных параметрах системы для функционирования ее в устойчивом состоянии.

Проблема математического моделирования МЭМС исследуется в работах [3–6], где авторы подбирают диэлектрические свойства для увеличения прогиба.

Мембраны квадратной формы распространены в производстве емкостных МЭМС датчиков: емкостных микромеханических ультразвуковых преобразователей (СМУТ), микрофонов и датчиков давления.



Рис. 1. Схема работы простейшей электростатической МЭМС

Математической моделью такой системы служит нелинейная краевая задача [7]

$$-\Delta u = \frac{\lambda}{(1-u)^2} \quad \text{в } \Omega \subset \mathbb{R}^2, \quad (1)$$

$$0 < u < 1 \quad \text{в } \Omega, \quad u|_{\partial\Omega} = 0, \quad (2)$$

где  $\lambda > 0$  – переменная, прямо пропорциональная квадрату фиксированного электрического напряжения.

## 2. Метод численного анализа

Для решения задачи (1), (2) воспользуемся методом двусторонних приближений [8, 9].

На конусе  $K$  неотрицательных в  $C(\bar{\Omega})$  функций введем в рассмотрение нелинейное операторное уравнение

$$u = Tu,$$

где

$$Tu = \lambda \int_{\Omega} \frac{G(x,s)}{(1-u(s))^2} ds,$$

$G(x,s)$  – функция Грина первой краевой задачи для оператора  $-\Delta$ .

Рассмотрим некоторые свойства оператора  $T$ .

Оператор  $T$  является непрерывным и монотонным на конусе  $K$ , поскольку для любых элементов  $u_1, u_2$  конуса из того, что справедливо неравенство

$$u_1 \leq u_2 < 1,$$

следует, что

$$Tu_1 \leq Tu_2.$$

Ввиду монотонности оператора  $T$ , построим инвариантный конусный отрезок

$$\langle v_0, w_0 \rangle = \{u \mid v_0 \leq u \leq w_0\},$$

$$T \langle v_0, w_0 \rangle \subset \langle v_0, w_0 \rangle.$$

Для этого рассмотрим схему последовательных приближений

$$u_{n+1}(x) = \lambda \int_{\Omega} \frac{G(x,s)}{(1-u_n(s))^2} ds, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

В качестве начальных приближений положим  $v_0 = 0, w_0 = \beta = \text{const} \in (0, 1)$ . Тогда получим первые верхние и нижние приближения

$$w_1(x) = \frac{\lambda}{(1-\beta)^2} \int_{\Omega} G(x,s) ds = \frac{\lambda u_0(x)}{(1-\beta)^2},$$

$$v_1(x) = \lambda \int_{\Omega} G(x,s) ds = \lambda u_0(x),$$

где  $u_0(x) = \int_{\Omega} G(x,s) ds$ .

Необходимо выбором  $\beta$  достичь выполнения условия  $w_1 \leq w_0$ , то есть  $\frac{\lambda u_0(x)}{(1-\beta)^2} \leq \beta$ . Значит,  $\beta$  определяется системой неравенств

$$\lambda \max_{x \in \Omega} u_0(x) \leq \beta(1-\beta)^2, \quad 0 < \beta < 1. \quad (4)$$

Если  $\Omega$  – единичный круг, то функция Грина имеет вид

$$G(x,s) = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{r_{xs}} - \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{\rho r_{xs}^1},$$

где  $x = (x_1, x_2), s = (s_1, s_2), s, s^1$  – точки, симметричные относительно единичной окружности,  $r_{xs}$ ,  $r_{xs}^1$  – расстояние между точками  $x$  и  $s, x$  и  $s^1$ ,  $\rho = \sqrt{s_1^2 + s_2^2}$ .

Тогда  $\max_{x \in \Omega} u_0(x) = \frac{1}{4}$ . Значит, система неравенств (4) для определения  $\beta$  принимает вид

$$\lambda \leq 4\beta(1-\beta)^2, \quad 0 < \beta < 1. \quad (5)$$

В работе [4] было доказано, что задача (1), (2) в единичном круге в  $\mathbb{R}^2$  имеет при  $0 < \lambda < 0,59259$  единственное положительное решение  $u^*$ .

Аналогично, если  $\Omega$  – квадрат со стороной  $\sqrt{\pi}$ , то функция Грина имеет вид

$$G(x_1, x_2, s_1, s_2) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\sqrt{\pi}x_1) \sin(k\sqrt{\pi}x_2) \sin(n\sqrt{\pi}s_1) \sin(k\sqrt{\pi}s_2)}{\pi(n^2 + k^2)}.$$

Тогда  $\max_{x \in \Omega} u_0(x) = 0,23146$  и система неравенств (4) для определения  $\beta$  принимает вид

$$\lambda \cdot 0,23146 \leq \beta(1-\beta)^2, \quad 0 < \beta < 1. \quad (6)$$

В работе [5] показано, что задача (1), (2), где  $\Omega$  – квадрат со стороной  $\sqrt{\pi}$ , имеет при  $0 < \lambda \leq 0,640$  единственное положительное решение  $u^*$ .

Ввиду монотонности оператора  $T$  справедливы неравенства

$$0 = v_0 \leq v_1 \leq u^* \leq w_1 \leq w_0 = \beta.$$

Продолжая этот процесс, получим

$$0 = v_0 \leq v_1 \leq \dots \leq v_n \leq \dots \leq u^* \leq \dots \leq w_n \leq \dots \leq w_1 \leq w_0 = \beta.$$

Итак, имеет место следующая теорема.

Теорема. Оператор  $Tu = \lambda \int_{\Omega} \frac{G(x,s)}{(1-u(s))^2} ds$  имеет при  $\lambda \in (0, \lambda_c)$  единственную неподвижную точку на конусном отрезке  $\langle v_0, w_0 \rangle$ ,  $w_0 = \beta$ ,  $v_0 = 0$ , причем  $\beta$  определяется неравенствами (4). Последовательные приближения, формируемые по правилу (3), двусторонне сходятся к неподвижной точке оператора  $T$ .

### 3. Результаты численного анализа

Нелинейное интегральное уравнение, эквивалентное задаче (1), (2), имеет вид

$$u(x) = \lambda \int_{\Omega} \frac{G(x,s)}{(1-u(s))^2} ds. \quad (7)$$

Для вычислительного эксперимента возьмем  $\lambda = \frac{1}{2}$ .

Тогда итерационный процесс решения уравнения (7) строим по схеме

$$u^{(k+1)}(x) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \frac{G(x,s)}{(1-u^{(k)}(s))^2} ds, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Пусть  $\Omega$  – единичный круг. Тогда задача (1), (2) имеет при  $\lambda \in (0; 0,59259)$  единственное решение.

Для определения  $\beta$  воспользуемся соотношениями (7). Получим

$$0,190983 \leq \beta \leq 0,5.$$

На рис. 2 представлены верхние приближения (сплошная линия) и нижние приближения (пунктирная линия) при  $n$  от 0 до 9 в сечении  $x_2 = 0$ .

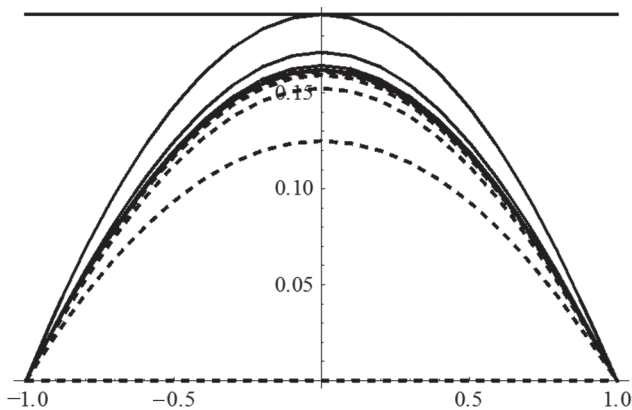


Рис. 2. Графики  $w_n(x_1, 0)$  и  $v_n(x_1, 0)$  при  $n$  от 0 до 9

Поскольку

$$v_9 \leq u^* \leq w_9,$$

$$\max_{x \in \Omega} (w_9(x) - v_9(x)) = 0,15 \cdot 10^{-5},$$

то с точностью  $0,75 \cdot 10^{-6}$  имеем

$$u^* \approx u_9 = \frac{w_9 + v_9}{2}.$$

В табл. 1 приведены значения приближенного решения  $u_9(x)$  с точностью  $\varepsilon = 0,75 \cdot 10^{-6}$  в точках области  $\bar{\Omega}$  с полярными координатами  $(\rho_i, \varphi_j)$ , где  $\rho_i = 0,25i$ ,  $i = \overline{0,2}$ ,  $\varphi_j = \frac{\pi j}{10}$ ,  $j = \overline{0,5}$ . Поверхность приближенного решения  $u_9(x)$  и его линии уровня представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

Таблица 1

Значения приближенного решения  $u_9(x)$  в точках области  $\Omega$

$\varphi \backslash \rho$	0	$\frac{\pi}{10}$	$\frac{\pi}{5}$	$\frac{3\pi}{10}$	$\frac{2\pi}{5}$	$\frac{\pi}{2}$
0	0,161804	0,161804	0,161804	0,161804	0,161804	0,161804
0,25	0,150309	0,150345	0,150381	0,150387	0,150394	0,150359
0,5	0,118363	0,118452	0,118541	0,118574	0,118607	0,118495

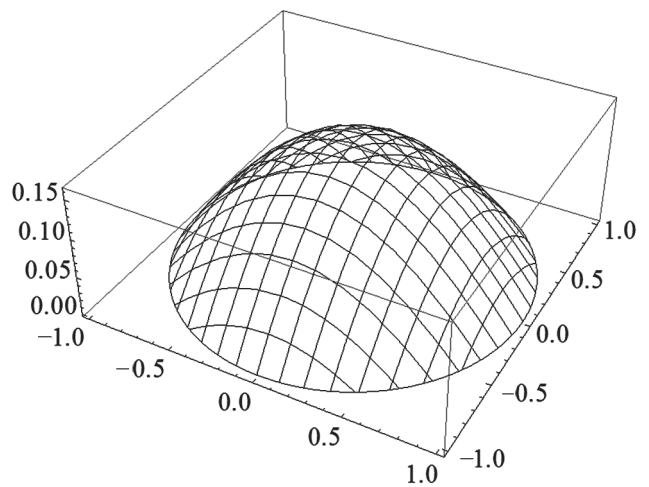


Рис. 3. Поверхность приближенного решения  $u_9(x)$

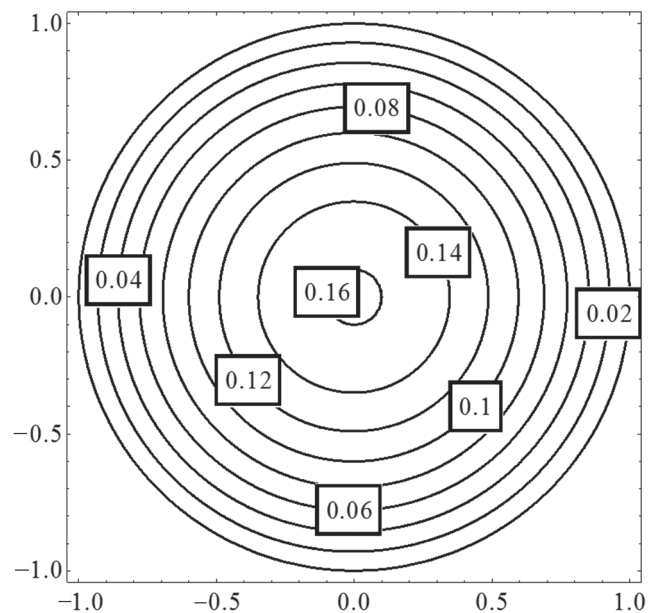


Рис. 4. Линии уровня приближенного решения  $u_9(x)$

Значения нормы приближенного решения задачи (1), (2) с точностью  $\varepsilon = 0,75 \cdot 10^{-6}$  в зависимости от параметра  $\lambda$  представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения нормы приближенного решения в зависимости от параметра  $\lambda$

$\lambda$	$\ u\ _C$	$\lambda$	$\ u\ _C$	$\lambda$	$\ u\ _C$
0,02	0,005038	0,22	0,060318	0,42	0,128525
0,04	0,010153	0,24	0,066437	0,44	0,136425
0,06	0,015348	0,26	0,072687	0,46	0,144587
0,08	0,020631	0,28	0,079076	0,48	0,153037
0,10	0,026001	0,30	0,085611	0,50	0,161804
0,12	0,031462	0,32	0,092304	0,52	0,170920
0,14	0,037020	0,34	0,099164	0,54	0,180429
0,16	0,042678	0,36	0,106202	0,56	0,190377
0,18	0,048446	0,38	0,113431	0,58	0,200825
0,20	0,054323	0,40	0,120867	0,59	0,207367

Таблица 3

Значения приближенного решения  $u_7(x)$  в точках области  $\bar{\Omega}$

$\rho \backslash \varphi$	0	$\frac{\pi}{10}$	$\frac{\pi}{5}$	$\frac{3\pi}{10}$	$\frac{2\pi}{5}$	$\frac{\pi}{2}$
0	0	0	0	0	0	0
0,25	0	0,045115	0,065114	0,069694	0,060376	0,032424
0,5	0	0,071323	0,107320	0,115796	0,098565	0,050286

Аналогично пусть  $\Omega = (0, \sqrt{\pi}) \times (0, \sqrt{\pi}) \subset \mathbb{R}^2$ . Тогда рассматриваемая задача имеет при  $\lambda \in (0; 0,640)$  единственное решение.

Определим  $\beta$  из соотношений (7). Тогда получим

$$0,166641 \leq \beta \leq 0,534823.$$

На рис. 5 представлены верхние приближения (сплошная линия) и нижние приближения (пунктирная линия)  $n$  от 0 до 7 в сечении  $x_2 = \sqrt{\pi}/2$ .

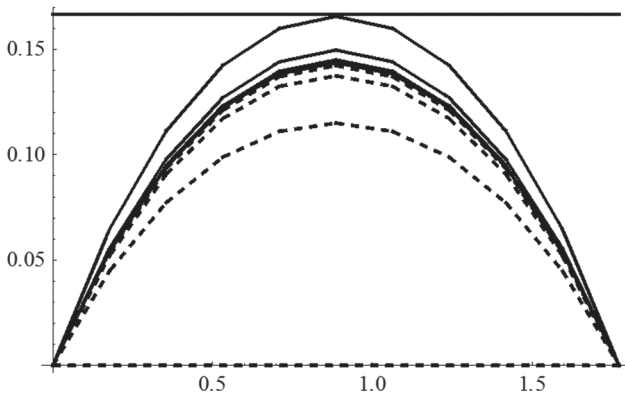


Рис. 5. Графики  $w_n(x_1, \sqrt{\pi}/2)$  и  $v_n(x_1, \sqrt{\pi}/2)$  при  $n$  от 0 до 7

Поскольку

$$v_7 \leq u^* \leq w_7,$$

$$\max_{x \in \Omega} (w_7(x) - v_7(x)) = 0,64 \cdot 10^{-5},$$

то с точностью  $0,32 \cdot 10^{-5}$  имеем

$$u^* \approx u_7 = \frac{w_7 + v_7}{2}.$$

В табл. 3 приведены значения приближенного решения  $u_7(x)$  с точностью  $\varepsilon = 0,32 \cdot 10^{-5}$  в точках области  $\bar{\Omega}$  с полярными координатами  $(\rho_i, \varphi_j)$ , где  $\rho_i = 0,25i$ ,  $i = \overline{0,2}$ ,  $\varphi_j = \frac{\pi j}{10}$ ,  $j = \overline{0,5}$ . Поверхность приближенного решения  $u_7(x)$  и его линии уровня представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

Значения нормы приближенного решения задачи (1), (2) с точностью  $\varepsilon = 0,32 \cdot 10^{-5}$  в зависимости от параметра  $\lambda$  представлены в табл. 4.

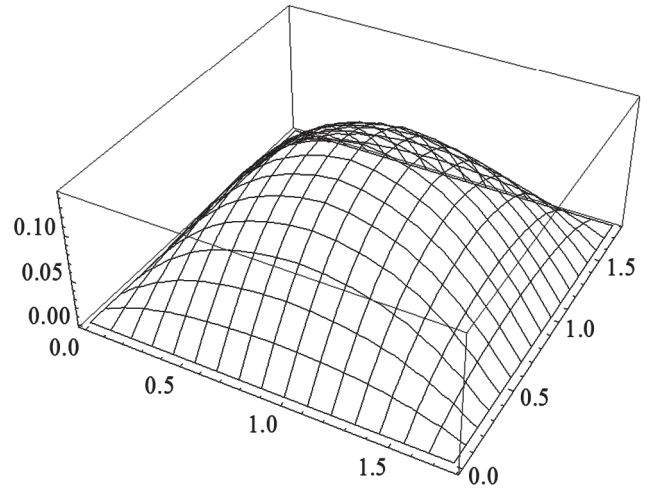


Рис. 6. Поверхность приближенного решения  $u_7(x)$

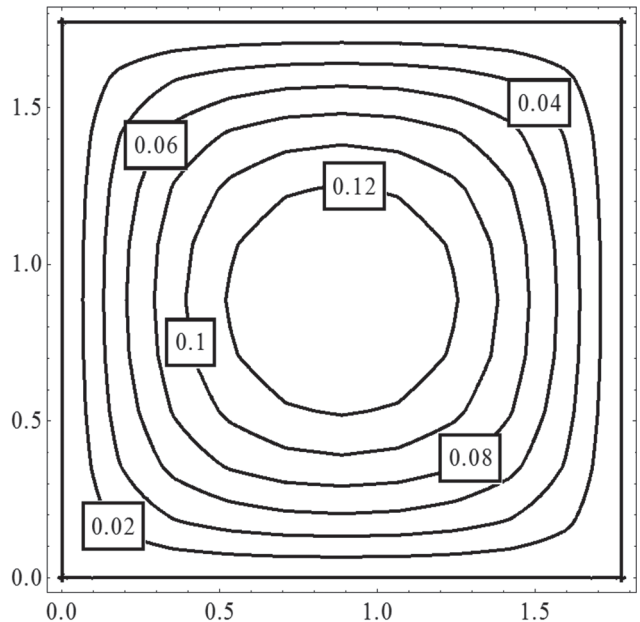


Рис. 7. Линии уровня приближенного решения  $u_7(x)$

На рис. 8 показано сравнение зависимости нормы приближенного решения от параметра  $\lambda$  для квадрата со стороной  $\sqrt{\pi}$  (сплошная линия) и единичного круга (пунктирная линия).

Таблица 4

Значения нормы приближенного решения в зависимости от параметра  $\lambda$

$\lambda$	$\ u\ _C$	$\lambda$	$\ u\ _C$	$\lambda$	$\ u\ _C$
0	0	0,22	0,054932	0,44	0,122042
0,02	0,004632	0,24	0,060432	0,46	0,129037
0,04	0,009327	0,26	0,066034	0,48	0,136228
0,06	0,014090	0,28	0,071742	0,50	0,143630
0,08	0,018921	0,30	0,077563	0,52	0,151261
0,10	0,023825	0,32	0,083502	0,54	0,159144
0,12	0,028803	0,34	0,089566	0,56	0,167304
0,14	0,033859	0,36	0,095763	0,58	0,175774
0,16	0,038997	0,38	0,102099	0,60	0,184603
0,18	0,044219	0,40	0,108585	0,62	0,193871
0,20	0,049529	0,42	0,115229	0,64	0,204028

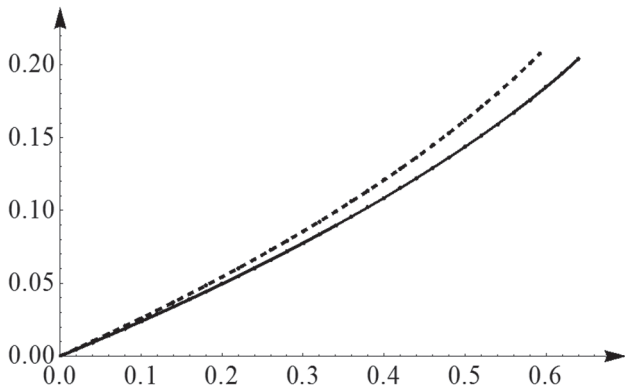


Рис. 8. Значения нормы приближенного решения в зависимости от параметра  $\lambda$

**Выводы**

В работе впервые построены двусторонние приближения к решению первой краевой задачи для нелинейного эллиптического уравнения, которое моделирует электростатическую микро-электромеханическую систему. Для выполнения

исследований был разработан программный продукт в пакете Mathematica 10, с помощью которого проведен ряд вычислительных экспериментов. Сравнивая полученные результаты прогиба при  $\lambda = 0,5$  для  $\Omega = \{x_1^2 + x_2^2 < 1\}$  и  $\Omega = (0, \sqrt{\pi}) \times (0, \sqrt{\pi})$  можно сделать вывод, что мембрана круглой формы для задачи (1), (2) позволяет увеличить величину прогиба. Результаты работы могут найти применение в прикладных научных исследованиях.

**Список литературы:**

1. Мухуров Н.И., Ефремов Г.И. Электромеханические микроустройства. Минск: Беларус. навука, 2012. 257 с.
2. Кончаковська О.С. Застосування методів нелінійного аналізу у напіввпорядкованих просторах до чисельного аналізу мікроелектромеханічних систем // Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті: Матеріали XXI Міжнародного молодіжного форуму, 25 – 27 квітня 2017, м. Харків: ХНУРЕ, 2017. Т. 7. С. 82 – 83.
3. Esposito P. Compactness of a nonlinear eigenvalue problem with a singular nonlinearity // Communications in Contemporary Mathematics. – 2008. – 10, № 01. – P.17-45.
4. Ghousoub N., Guo Y. On the partial differential equations of electrostatic MEMS devices: stationary case // SIAM Journal on Mathematical Analysis. – 2007. – 38, № 5. – P.1423-1449.
5. Guo Y., Pan Z., Ward M.J. Touchdown and pull-in voltage behavior of a MEMS device with varying dielectric properties // SIAM Journal on Applied Mathematics. – 2005. – 66, № 1. – P.309-338.
6. Guo Z., Wei J. Infinitely many turning points for an elliptic problem with a singular non-linearity // Journal of the London Mathematical Society. – 2008. – 78, № 1. – P.21-35.
7. Lin F., Yang Y. Nonlinear non-local elliptic equation modelling electrostatic actuation // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – The Royal Society, 2007. – 463, №. 2081. – P.1323-1337.
8. Красносельский М.А. Положительные решения операторных уравнений. М.: ГИФМЛ, 1962. 394 с.
9. Онойцев В.И., Хуродзе Т.А. Нелинейные операторы в пространствах с конусом. Тбилиси: Изд-во Тбилис. ун-та, 1984. 246 с.

Поступила в редколлегию 12.04.2017



УДК 519.234.7



В.Л. Шергин, Э.Э.Дереза, В.С.Передерий, М.Р.Полиит  
ХНУРЭ, г.Харьков, Украина, vadim.shergin@nure.ua

## ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЮЛА

Проведён анализ области применения модели Юла и методов оценивания параметра распределения Юла-Саймона. Предложены методы оценивания искомого параметра. Проведён численный эксперимент, в котором моделировалась сеть Барабаши-Альберт и проводился сравнительный анализ точности оценок параметра распределения Юла. Показано, что оценки, полученные на основе ряда отношений обычной функции вероятности к кумулятивной являются несмещёнными.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЮЛА, СТЕПЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, СЕТЬ БАРАБАШИ-АЛЬБЕРТ, НЕСМЕЩЁННЫЕ ОЦЕНКИ

### Введение

Одним из самых убедительных и широко применимых механизмов, порождающих степенные законы, является процесс Юла [1]. Он описывает динамику растущей системы, в которой действует принцип *преференциального присоединения* (он же принцип Гибрата, эффект Матфея, «богатый становится богаче»): вероятность присоединения нового микрообъекта к макрообъекту прямо пропорциональна количеству микрообъектов, уже имеющихся у этого макрообъекта.

Изначально сам Юл построил эту модель для описания динамики возникновения новых родов растений (макрообъектов) и объяснения степенного закона их распределения по числу видов (микрообъектов). Закон распределения Юла (называемый также законом Юла-Саймона) имеет вид [2]:

$$p_k = (\theta - 1) \cdot V(k, \theta) = (\theta - 1) \frac{\Gamma(k)\Gamma(\theta)}{\Gamma(k + \theta)}, \quad (1)$$

где  $\Gamma(x)$  – гамма-функция,  $V(x, y)$  – бета-функция (эйлеров интеграл первого рода).

Поскольку бета-функция имеет степенной хвост ( $V(k, \theta) \sim k^{-\theta}$  при  $k \gg 1$  и фиксированном  $\theta$ ), то распределение Юла (1) асимптотически стремится к (дискретному) степенному закону:

$$p_k \approx C \cdot k^{-\theta}. \quad (2)$$

Одной из наиболее изученных вычислительных моделей, динамика которой описывается процессом Юла, является модель сети Барабаши-Альберт [3]. Эта модель описывает рост сети (неориентированного графа), при условии, что вероятность присоединения новой вершины к вершине, имеющей степень  $k$ , прямо пропорциональна значению  $k$ . В частности, если связи образуются только с новыми вершинами (и тогда граф становится деревом), то распределение вершин по степеням соответствует закону Юла с параметром  $\theta = 3$ .

### 1. Актуальность проблемы и постановка задачи исследования

Процесс Юла – правдоподобный и достаточно общий механизм, который может объяснить степенные распределения, наблюдающиеся в природе, и при подходящем наборе параметров может

генерировать распределения с показателями в большом диапазоне.

Модель Юла была успешно адаптирована и обобщена исследователями для объяснения степенных законов во многих системах [4]. Наиболее известные примеры – распределения городов по числу жителей, домохозяйств по доходам, число цитирований научных статей, число ссылок на веб-страницы всемирной сети [1]. Для перечисленных примеров процесс Юла стал наиболее популярной теорией.

При этом важно отметить, что во всех перечисленных исследованиях модель Юла использовалась именно для объяснения степенных законов распределений, но не для анализа данных. Это было продиктовано простотой анализа степенных распределений и может быть вполне обоснованно при больших количествах макрообъектов (домохозяйств, статей) и неопределённости их нижних границ (величины доходов домохозяйств, населения городов) в исследуемых выборках.

В то же время, при малых значениях  $k$  (т.е. численности микрообъектов в макрообъекте), разница между распределениями Юла и степенным является весьма заметной. Так, модель древовидной сети Барабаши-Альберт [3] предполагает  $\theta = 3$ . В то же время, иногда постулируется [2, 5], что параметр этой модели ( $\theta$ ) может варьироваться от 2 до 3. При этом зачастую происходит попытка компенсировать систематическую ошибку оценивания параметра, вызванную подменой закона распределения, за счёт введения дополнительных параметров  $k_0, c$  [4].

Единственным известным методом оценивания параметра распределения Юла ( $\theta$ ), не основанным на сведении закона Юла (1) к степенному, является метод, предложенный Гарсиа [6]. Он представляет собой итеративную реализацию метода наибольшего правдоподобия для закона (1). Несмотря на высокую точность оценивания, этот метод обладает существенным недостатком: сложностью реализации, обусловленной как использованием неэлементарных функций, так и итеративностью метода.

Таким образом, проблема оценивания параметра распределения Юла ( $\theta$ ) является актуальной научной и практической задачей. Для её решения

в настоящей работе рассматриваются и решаются следующие задачи:

- анализ традиционных методов оценивания параметра распределения Юла (на основе log-log регрессии), выявление причин возникновения системной погрешности;
- модификация традиционного метода оценивания  $\theta$  путём сведения закона Юла к сдвинутому степенному распределению;
- разработка метода оценивания  $\theta$  без использования итераций и степенных распределений;
- сравнение точности полученных оценок с помощью численного моделирования.

## 2. Оценивание параметра распределения Юла с помощью степенного распределения

Как было отмечено во введении, закон распределения Юла (1) при больших значениях  $k$  асимптотически стремится к дискретному степенному закону. Поэтому если данные действительно соответствуют закону (1), то зависимость  $p_k(k)$  в двойных логарифмических координатах будет очень близка к линейной.

Согласно [7], при практическом анализе безмасштабных данных предпочтительнее пользоваться эмпирическими значениями не самой функции вероятности  $p_k$ , а (также эмпирическими) значениями дополненной функции распределения (кумулятивной функции вероятности)  $G_k = P(x \geq k)$ . Для распределения Юла (1) эта функция имеет вид

$$G_k = (\theta - 1) \cdot V(k, \theta - 1) = \frac{\Gamma(k)\Gamma(\theta)}{\Gamma(k + \theta - 1)}. \quad (3)$$

При  $k \gg 1$  справедливо приближение

$$G_k \approx C \cdot k^{-(\theta-1)}. \quad (4)$$

Традиционный метод оценки параметра степенного распределения состоит в применении метода наименьших квадратов (МНК) к прологарифмированной модели (4):

$$\log(G_{k_i}) = \log(C) - (\hat{\theta}^{(1)} - 1) \cdot \log(k_i). \quad (5)$$

К сожалению, если истинным распределением случайной величины является закон Юла (3), а не степенной (4), то получаемые оценки являются смещёнными. В самом деле, при  $k \rightarrow \infty$  наклон кривой (5) действительно равен

$$\frac{\log(G_{k+1}) - \log(G_k)}{\log(k+1) - \log(k)} = \frac{\log(\frac{k}{k+\theta-1})}{\log(\frac{k+1}{k})} \approx -(\theta - 1).$$

В то же время, при  $k=1$  этот наклон составит  $-\frac{\log(\theta)}{\log(2)} = -\log_2 \theta$ . На графике (рис. 1) приведены

результаты оценивания параметра распределения степеней вершин сети Барабаши-Альберт (построенной согласно процессу Юла с истинным значением параметра  $\theta=3$ ).

Как и было показано выше, при больших значениях  $k$  график дискретного степенного распределения (построенный при  $\theta=3$ ) практически

сливается с графиком распределения Юла, а при малых  $k$  заметно отклоняется от него. В результате угол наклона регрессионной прямой (показанной пунктиром) смещается в сторону уменьшения оценки  $\theta$ .

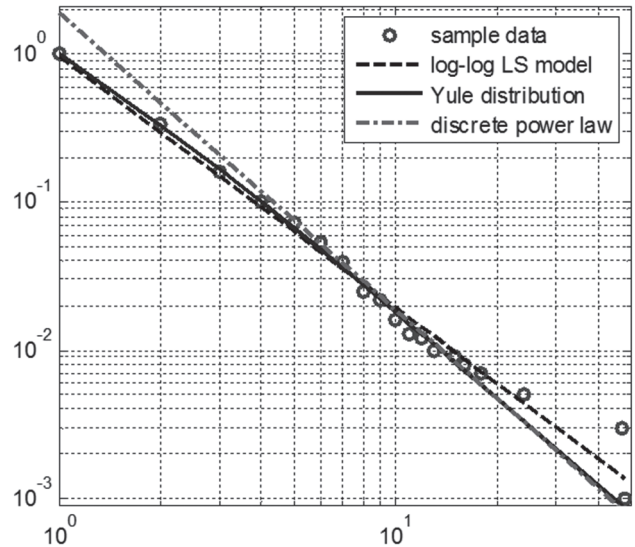


Рис. 1. Кумулятивная функция вероятности распределения степеней вершин сети Барабаши-Альберт

Данные численного эксперимента наглядно иллюстрируют, что оценка параметра распределения Юла, полученная традиционным методом сведения его к степенному, является смещённой. Рассчитать математическое ожидание смещения теоретическими методами не представляется возможным. В то же время, получить численную оценку смещений не составляет труда (рис.2).

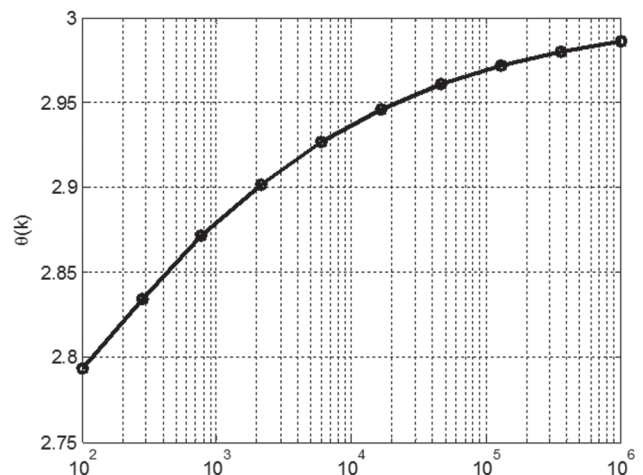


Рис. 2. Зависимость МНК-оценок параметра распределения Юла от объёма выборки

Согласно представленной зависимости МНК-оценок параметра  $\theta$  от объёма выборки, соответствующей закону Юла при  $\theta=3$ , для выборки из 1000 элементов смещение составляет  $\Delta\theta(1000) = 0.1208$ . Прибавив это значение к  $\hat{\theta}^{(1)}$  (рис. 1), улучшаем оценку:  $\hat{\theta}^{(2)} = \hat{\theta}^{(1)} + \Delta\theta = 1.6958 + 0.1208 = 1.8166$ .

### 3. Оценивание параметра распределения Юла на основе сдвинутого степенного распределения

Без нарушения общности, сравним вид закона Юла (1) и приближающего его степенного закона (2) при  $\theta=3$ . В первом случае функция вероятности имеет вид  $p_k = \frac{4}{k(k+1)(k+2)}$ , а во втором —  $p_k = C \cdot k^{-3}$ . Неудивительно, что наибольшие различия между этими законами наблюдаются при малых значениях  $k$ .

Представляется логичным искать приближение закона Юла не в форме (2), а в форме

$$p_k = C \cdot (k+m)^{-\theta}. \quad (6)$$

Константу  $C$  находим из условий нормировки закона (6):  $C = 1/\zeta(\theta, m+1)$ , (где  $\zeta(z, v)$  — дзета-функция Гурвица), а константу  $m$  — из условия совпадений значений функций вероятности (1) и (6) при  $k=1$ :

$$p_1 = \frac{\theta-1}{\theta} = \frac{(m+1)^{-\theta}}{\zeta(\theta, m+1)}. \quad (7)$$

Численное решение уравнения (7) показывает, что при  $\theta=3$   $m \approx 0.7369$ , а  $m(\theta=2) \approx 0.3896$ ; зависимость  $m(\theta)$  очень близка к линейной в широком диапазоне значений  $\theta > 1$ . Так, для диапазона  $\theta \in [2; 3]$   $m \approx 0.34713 \cdot \theta - 0.30212$ . Найденное соотношение позволяет построить итеративную процедуру оценивания параметра распределения Юла: для некоторого начального приближения  $m = m_0$  строим модель

$$\log(p_{k_i}) = \log(C) - \hat{\theta}^{(3)} \cdot \log(k_i + m), \quad (8)$$

по которой находим оценку  $\theta$  с помощью МНК. После чего можно уточнить значение параметра  $m$  и повторить итерацию.

Вместе с тем, для большинства процессов и явлений, динамика которых объясняется процессом Юла, диапазон значений  $\theta$  составляет  $\theta \in [2; 3]$ , поэтому можно утверждать, что любое значение  $m$ , взятое из соответствующего диапазона  $m \in [0.3896; 0.7369]$ , будет являться заведомо лучшим приближением, чем нулевое (соответствующее обычному степенному распределению и модели (2)).

В настоящей работе предлагается выбрать «круглое» значение  $m = 0.5$  и ограничиться однократным оцениванием параметра Юла по модели (8).

### 4. Оценивание параметра распределения Юла без использования степенных распределений

Из выражений (1), (3) следует, что относительный прирост кумулятивной функции вероятности, равный отношению обычной функции вероятности к кумулятивной имеет вид

$$\delta_k = \frac{G_k - G_{k+1}}{G_{k+1}} = \frac{p_k}{G_{k+1}} = \frac{\theta-1}{k}. \quad (9)$$

Если выборка не содержит пропусков, т.е. массив значений  $k_i$  имеет единичный шаг, то оценку

параметра распределения Юла легко получить из (9) как сумму произведений  $k_i$  на  $\delta_i$ , либо регрессией  $\delta_i$  на  $1/k_i$ .

Отсутствие пропусков означает, что в выборке обязаны присутствовать макрообъекты со всеми возможными численностями составляющих их микрообъектов из заданного диапазона от  $k_{min}$  до  $k_{max}$ . Например, если существуют статьи, процитированные сто раз, то должна быть хотя бы одна статья, процитированная 99 раз. Очевидно, что в реальных выборках это условие не выполняется. Например, для выборки, сгенерированной на рис.1,  $k_i = [1 \dots 14, 16, 19, 20, 22, 24, 33, 48]$ .

Выражение (9) можно обобщить на случай, когда шаг  $d_i = k_{i+1} - k_i$  больше единицы:

$$\begin{aligned} \delta_i &= \frac{p_{k_i}}{G_{k_{i+1}}} = \frac{\Gamma(k_i)\Gamma(k_i + \theta - 1 + d_i)}{\Gamma(k_i + d_i)\Gamma(k_i + \theta - 1)} - 1 = \\ &= \prod_{j=k_i}^{k_{i+1}-1} \left(1 + \frac{\theta-1}{j}\right) - 1 \end{aligned} \quad (10)$$

Учитывая, что в реальных выборках неединичные шаги  $d_i$  находятся в диапазоне больших значений  $k_i$  (численностей микрообъектов в макрообъектах), отбросим слагаемые второго и выше порядков (по  $j$ ) в (10). Получим приближённое выражение

$$\delta_i \approx (\theta-1) \cdot h_i, \quad h_i = \sum_{j=k_i}^{k_{i+1}-1} \left(\frac{1}{j}\right). \quad (11)$$

Для получения искомой оценки параметра распределения Юла построим линейную регрессию  $\delta_i$  на  $h_i$ :

$$\hat{\theta}^{(4)} = 1 + \frac{\sum \delta_i h_i}{\sum h_i^2}. \quad (12)$$

Следует отметить, что полученная оценка основана только на самом законе Юла (1), (3). Приближение этого распределения степенным не использовалось.

### 5. Сравнение точности полученных оценок параметра распределения Юла с помощью численного моделирования

Для сравнения качества оценок параметра распределения Юла, полученных разными методами, было проведено имитационное моделирование. Генерировалась сеть Барабаши-Альберт из  $n=1000$  вершин при истинном значении параметра  $\theta=3$ , после чего строились оценки этого параметра: методом приближения к степенному распределению (традиционная  $\log\text{-}\log$  оценка  $\theta^{(1)}$ ), скорректированная оценка  $\theta^{(2)}$ , оценки  $\theta^{(3)}$ , полученные на основе сдвинутого степенного распределения (при  $m=0.5$  и при «точном» значении  $m(\theta=3)=0.7369$ ), и оценка  $\theta^{(4)}$  (12), построенная на основе ряда отношений обычной функции вероятности к кумулятивной.

Полученные значения оценок были усреднены по  $N=100$  реализациям сети. В табл. 1

представлены средние значения и среднеквадратичные отклонения полученных оценок (относительно средних –  $s(\theta)$  и относительно истинного значения –  $\sigma(\theta)$ ).

**Таблица 1**

**Результаты оценивания параметра распределения Юла по данным численного эксперимента**

	$\theta^{(1)}$	$\theta^{(2)}$	$\theta_{m=1/2}^{(3)}$	$\theta_{m=m_3}^{(3)}$	$\theta^{(4)}$
Среднее	2,7124	2,8332	2,9194	2,9200	2,9833
$s(\theta)$	0,0739	0,0739	0,1021	0,1020	0,1198
$\sigma(\theta)$	0,2983	0,1832	0,1304	0,1299	0,1210

Данные результаты показывают, что смещение оценки  $\theta^{(4)}$  (12) является минимальным среди всех приведенных. Кроме того, можно утверждать, что оценка  $\theta^{(3)}$ , построенная на основе сдвинутого степенного распределения, предпочтительнее оценок  $\theta^{(1)}$  и  $\theta^{(2)}$ . Причём величина сдвига ( $m$ ) слабо влияет на точность этой оценки.

**Выводы**

В настоящей работе проведён анализ области применения модели Юла и методов оценивания параметра распределения Юла-Саймона. Он показал, что традиционный метод log-log регрессии, основанный на приближении закона Юла степенным, порождает смещённые оценки, а метод, предложенный Гарсия [6], характеризуется высокой вычислительной сложностью.

Предложены три оригинальных метода оценивания искомого параметра: коррекция log-log оценки (аддитивным фактором, зависящим от объёма выборки), оценивание параметра Юла с помощью сдвинутого степенного распределения и оценивание на основе ряда отношений обычной

функции вероятности к кумулятивной.

Проведён численный эксперимент, в котором полученные методы оценивания сравнивались по точности на модельных объектах – сетях Барабаши-Альберт. Результаты моделирования наглядно продемонстрировали преимущество последних из упомянутых оценок – единственных, при построении которых не использовалось приближение закона распределения Юла дискретным степенным.

Очевидным направлением дальнейших исследований должно стать доказательство несмещённости оценки, построенной на основе ряда отношений обычной функции вероятности к кумулятивной.

**Список литературы:**

1. *Dorogovtsev, S.N.* Evolution of Networks: From Biological Networks to the Internet and WWW [Text] / Dorogovtsev S.N., Mendes J.F.F. – Oxford, USA: Oxford University Press, 2003. – 280 p.
2. Ландэ, Д.В. Моделирование сложных сетей: учебное пособие [Текст] / А.А. Снарский, Д.В. Ландэ — К. : НТУУ «КПИ», 2015. — 212 с.
3. *Albert, R.* Statistical mechanics of complex networks [Text] / Albert R., Barabasi A.- L : Rev. Mod. Phys. - 2002. - V. 74. - p. 42-97.
4. *Newman, M.E.J.* Power laws, Pareto distributions and Zipf's law [Text] / Mark Newman. – Contemporary Physics, 2005, 46(5). p.323-351. doi: 10.1080/00107510500052444.
5. *Олемской А.И.* Статистика сложных сетей (обзор) [Text] / А.И. Олемской, И.А. Олемской - «Вісник СумДУ». – 2006. – №6 (90). – С.21-47.
6. *Garcia G.J.M.* A fixed-point algorithm to estimate the Yule-Simon distribution parameter [Text] / Garcia Garcia J.M. – Applied Mathematics and Computation, 2011, 217, p.8560-8566.
7. Масштабно-инвариантные сети [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.cognitivist.ru/er/kernel/power\\_laws\\_2.xml](http://www.cognitivist.ru/er/kernel/power_laws_2.xml) – 2014 г. – Загл. с экрана.

*Поступила в редколлегию 18.05.2017*



УДК 519.87:622.233



О.І. Повзун

ІІ ДонНТУ, м. Покровськ, Україна, povzun.aleksey@gmail.com

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ ПІДРИВНИХ СВЕРДЛОВИН У ГІРСЬКИХ МАСИВАХ

В статті приведені результати дослідження технологічних показателів буріння взривних скважин діаметром 215,9 мм в известняке крепостью 8 по шкале проф. М. М. Протодьяконова серийно выпускаемым трёхшарошечным и разработанным одношарошечным долотом с вертикальной цапфой. Применение предлагаемого долота повышает скорость бурения и значительно уменьшает уровень вибраций на патроне вращателя бурового станка.

ДОЛОТО, ШВИДКІСТЬ БУРІННЯ, ЕНЕРГОЄМНІСТЬ, РІВЕНЬ ВІБРАЦІЇ, ДІАГРАМА ТРИВИ-МІРНА, ФАКТОР ВАРІЮВАННЯ, ПАРАМЕТР ОПТИМІЗАЦІЇ

### Вступ

Бурові шарошкові долота – основний інструмент, за допомогою якого здійснюється руйнування гірської породи і влаштування свердловин у гірництві, геологорозвідці, а також в умовах глибокого буріння на нафту і газ.

Процес заглиблення свердловин у гірських масивах пов'язаний з необхідністю застосування ефективних породоруйнівних доліт. Утруднення умов буріння визначається збільшенням глибини залягання природних енергоресурсів (руда, вугілля, нафта, газ) та ускладненням гірничо-геологічних умов (висока міцність, неоднорідність, шаруватість гірських порід тощо).

Буріння горизонтів, складених твердими породами, є найважчим процесом, що вимагає великої витрати доліт і визначає загальний ресурс часу для буріння свердловин у цілому.

Окрім того, останнім часом набули поширення свердловини складних профілів, в тому числі з проведенням похило направлених і горизонтальних ділянок стовбурів; тому наразі до ефективних конструкцій породоруйнівних елементів інтерес суттєво зріс.

Під час буріння в породах від середньої міцності до найміцніших абразивних близько 70% відмов доліт відбувається через псування частини породоруйнівних зубів і руйнування корпусів шарошок. Підвищення довговічності спорядження бурових доліт залежить від цілого комплексу конструктивних і технологічних факторів, що впливають на стійкість і надійність роботи зубів і шарошок у цілому. Поліпшення будь-якого фактору здатне лише частково збільшити ресурс роботи долота; тому підвищення ефективності його роботи можливе тільки за умови одночасного проведення взаємопов'язаних досліджень.

Серед опорних доліт найчастіше використовують тришарошкові долота, і чим більша глибина свердловини, тим частіше їх застосовують. Однак зі зменшенням діаметрів доліт тришарошкові долота все більше стають проблемними, оскільки вони мають слабку опору, і тому їх ресурс знижується.

Міцніші за опорою одношарошкові долота застосовують обмежено. Це пов'язано з тим, що механізм буріння такими долотами з одного боку не достатньо вивчений, а з іншого – спостерігається консерватизм у влаштуванні свердловин і у виробництві самих доліт.

Таким чином, проблема підвищення ефективності бурового одношарошкового долота є актуальною для гірничої, нафтової і газової промисловостей та геологорозвідки.

### 1. Аналіз досліджень та формулювання завдань дослідження

Наразі, у зв'язку зі значним подорожчанням бурових установок, шарошкових доліт і електроенергії, основним джерелом підвищення ефективності функціонування всієї бурової системи «гірська порода – бурове долото – бурова установка» є вибір типів доліт і параметрів їх відпрацювання відповідно до існуючих фізико-механічних властивостей порід певної копалини.

Принципове значення при виборі шарошкового долота і режиму буріння має питання кількісної оцінки властивостей гірських порід.

Шарошкові долота найбільш поширені. На них припадає 90-95% всього об'єму проходження свердловин. За ДСТУ ГОСТ 20692:2004 шарошкові долота для суцільного буріння свердловин виготовляються трьох типів: одношарошкові, двошарошкові і тришарошкові [1].

У найбільш широких асортименті і кількості виготовляють долота діаметрами 190 (190,5) мм і особливо 214 (215,9) мм. Це пояснюється порівняно великим об'ємом проходження і різноманітністю фізико-механічних властивостей гірських порід, які припадають.

Досить відомим є тришарошкове долото [1] – Ш АВ-215,9 Т-П. Позначення долота розшифровують рівень вібрацій на патроні обертача бурового верстата під час буріння U, дБа, ться так: Ш – тришарошкове; А – на двох і більше підшипниках ковзання; В – тіла кочення; 215,9 – діаметр свердловини в мм; Т – для буріння малоабразивних твердих порід; П – долото з центральною продуквою.

Шарошкові долота виготовляють із *суцільним* або *зварним* корпусом.

*Суцільні* (корпусні) конструкції використовують для доліт діаметром понад 394 мм.

*Долота зі зварним корпусом*, які називають секційними, мають переважне поширення в світовій практиці. Корпус секційних доліт зварюється з попередньо зібраних секцій, число яких дорівнює числу шарошок долота. Кожна секція складається з лапи 1 з похилою цапфою 2 і конусоподібної шарошки 4, яка обертається на підшипниках 3 (рис. 1).

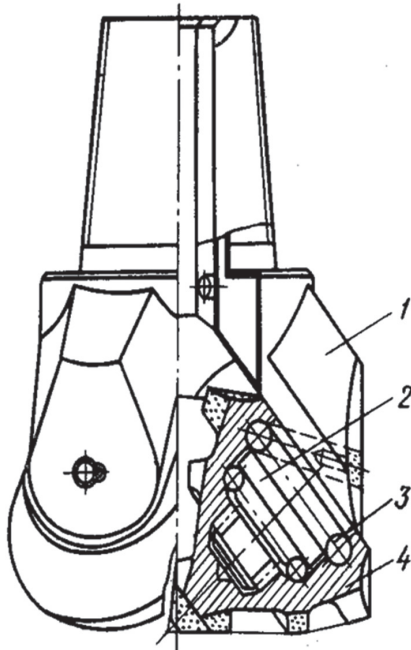


Рис. 1. Тришарошкове долото III АВ-215,9 Т-П

В плані шарошки розміщуються зі зміщенням осей відносно осі долота в напрямку обертання долота. У вертикальній площині кут між віссю долота і осями обертання шарошок змінюється в межах 52-57°.

Шарошки оснащені дрібними зубцями з великим кутом загострення.

Загальна особливість доліт всіх типів – зниження проходження на долото зі зменшенням його діаметра.

Загальним недоліком тришарошкового долота є утворення на забої свердловини багато пилу і, як наслідок, значна витрата енергії на руйнування породи.

В практиці експлуатації кар'єрів одним з найпоширеніших показників опору гірських порід руйнуванню є найбільш простий, зручний і універсальний коефіцієнт тертя, запропонований професором М.М. Протодьяконовим [2].

Основними вхідними оперативно регульованими параметрами забойного процесу є осьове навантаження на долото  $P$  і швидкість його обертання  $W$ . Головними вихідними параметрами є швидкість буріння  $V_{\text{бур.}}$ , енергоємність буріння  $E_{\text{бур.}}$  і рівень вібрацій долота  $U$  [2].

При розв'язанні задачі оптимізації складного процесу буріння безпосередньо у виробничих умовах одним з головних є питання вибору форм і методів визначення параметрів базових технологічних залежностей для оцінки ефективності руйнування гірських порід і інтенсивності зносу шарошкового долота.

Під час об'ємного руйнування породи по мірі збільшення поточної проходки долота швидкість буріння зменшується (внаслідок зносу долота) за лінійним законом до моменту відмови долота, точніше, до моменту переходу об'ємного руйнування породи в режим стирання [2]. Вибір раціонального типу шарошкового долота полягає у порівнянні питомих витрат  $S_{\text{б. min}}$  при бурінні базовим долотом і новим (рекомендованим)  $S_{\text{н. min}}$ , тобто визначається умовою  $S_{\text{н. min}} < S_{\text{б. min}}$ . Осьове навантаження встановлюють не вище за допустиме за міцністю долота, що зазначена у паспорті на нього.

Метою даної роботи є розроблення математичної моделі технологічних параметрів буріння підричних свердловин базовим і розробленим долотами і визначення оптимальних режимів буріння.

Використовуючи метод математичного планування експерименту, завданнями дослідження є:

- експериментальне визначення швидкості буріння базовим тришарошковим долотом і розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою;
- розрахункове обчислення енергоємності буріння базовим тришарошковим долотом і розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою;
- натурне вимірювання рівня вібрацій на патроні обертача бурового станка зазначеними долотами;
- порівняння одержаних результатів експерименту.

## 2. Розроблення плану експерименту режимних параметрів процесу буріння

В даній роботі представлено розроблене одношарошкове долото з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30, яке дає можливість передавати осьове зусилля через його корпус безпосередньо на шарошку.

Позначення пропонованого долота означають: О – одношарошкове; Д – долото; В – вертикальна цапфа; 215,9 – діаметр свердловини в мм; 30 – кут між віссю долота і осями обертання шарошок в градусах.

Схема одношарошкового долота з вертикальною цапфою, що пропонується, представлена на рис. 2. При дії долота на забій твердосплавні зубки 7 заглиблюються в породу; шарошка 1 утримується від обертання. Під час обертання корпусу 2 долота воно своєю похилою торцевою поверхнею через радіально-упорний підшипник 6 тисне на шарошку 1, яка змінює своє положення відносно забою, нахилиючись в різні боки по мірі обертання

корпусу. На шарошку діють сили з боку торцевої поверхні корпусу і з боку сферичного підшипника, встановленого на вертикальній цапфі, які утримують бурову головку від зсуву і дозволяють перетворити момент обертання корпусу долота в момент обертання шарошки, що діє на забій у площині, яка проходить через вісь обертання корпусу долота.

Вихідними параметрами процесу буріння на трьох рівнях було прийнято: зусилля подачі бурового долота на забій  $P$ , кН ( $X_1$ ) і частота обертання бурового інструмента  $W$ , рад./с ( $X_2$ ).

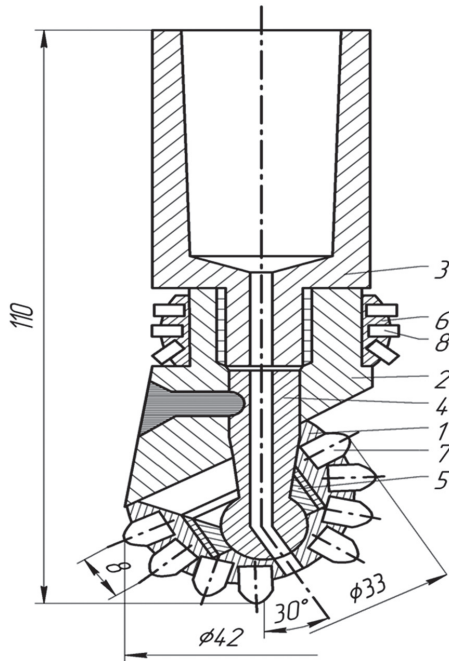


Рис. 2. Одношарошкове долото ОДВ-215,9-30:

- 1 — шарошка; 2 — корпус; 3 — цапфа;
- 4 — сферичний підшипник; 5 — гайка;
- 6 — радіально-упорний підшипник;
- 7 — твердосплавні зубки; 8 — гайка;

Вихідними (реєстрованими) факторами були: термін буріння одного метра свердловини, струм і напруга ротора електродвигуна. За результатами вимірів було розраховано швидкість буріння  $V_{бур}$ , м/хвил. ( $Y_1$ ) і потужність, що була споживана електродвигуном ротора бурового станка під час буріння. Енергоємність буріння  $E_{бур}$ , мДж/м ( $Y_2$ ) обчислювали шляхом ділення витраченої потужності на швидкість буріння одного метра свердловини. Рівень вібрацій бурового станка  $U$ , дБА вимірювали за допомогою приладу ІШВ-1, датчик прискорень якого було встановлено на патроні ротора бурового верстата.

Середні значення експериментальних даних наведено в табл. 1.

Оптимальні параметри процесу буріння визначали як оптимальні області допустимих значень факторів  $X_1, X_2$  (табл. 2).

Ці оптимальні області обмежені поверхнями рівня функції відклику за кожним з параметрів оптимізації (табл. 3).

Як критерій оптимальності плану прийнято критерій D-оптимальності, що пов'язаний з мінімізацією об'єму еліпсоїду розсіювання оцінок параметрів рівнянь регресії [3], з урахуванням якого було побудовано план експерименту (табл. 4).

Таблиця 2

Значення факторів варіювання

Вхідні параметри	Фізичний зміст фактору		
	Зусилля подачі бурового долота на забій, $P$ , кН	Частота обертання бурового станка, $W$ , рад./с	
	$X_1$	$X_2$	
Інтервал варіювання	45	5	
Рівні фактору	-1	90	5
	0	135	10
	+1	180	15

Таблиця 1

Швидкість буріння  $V_{бур}$ , енергоємність буріння  $E_{бур}$ , та рівень вібрацій  $U$  на патроні обертача бурового станка для базового (серійного) ІІІ АВ-215,9 Т-П та розробленого (пропонованого) ОДВ-215,9-30 доліт

№, з п	Вхідні (варійовані) фактори				Вихідні (вимірювані) параметри						
	Кодовані		Натурні		Одношарошкове долото ОДВ-215,9-30			Тришарошкове долото ІІІ АВ-215,9 Т-П			
	$X_1$	$X_2$	$P$ , кН	$W$ , рад./с	$V_{бур}$ ( $Y_1$ ), м/хвил.	$E_{бур}$ ( $Y_2$ ), мДж/м	$U$ ( $Y_3$ ), дБА	$V_{бур}$ ( $Y_1''$ ), м/хвил.	$E_{бур}$ ( $Y_2''$ ), мДж/м	$U$ , дБА	
1	-1	-1	90	5,0	0,223	7,1	34	0,207	3,6	63	
2	-1	0	90	10,0	0,343	6,6	35	0,250	5,8	75	
3	-1	1	90	15,0	0,457	6,0	36	0,300	6,2	75	
4	0	-1	135	5,0	0,278	5,7	34	0,240	3,6	65	
5	0	0	135	10,0	0,425	5,2	35	0,345	4,7	70	
6	0	1	135	15,0	0,500	4,8	36	0,370	5,4	65	
7	1	-1	180	5,0	0,336	4,7	33	0,370	5,4	65	
8	1	0	180	10,0	0,497	4,2	34	0,265	3,6	64	
9	1	1	180	15,0	0,539	4,0	36	0,422	3,7	64	
Середні значення вихідних параметрів					0,459	5,37	34,78	0,313	4,64	66,7	
Значення вихідних параметрів відносно тришарошкового долота					1,466	1,157	0,52	1	1	1	

Таблиця 3

Параметри оптимізації режиму буріння

№ з.п.	Код параметра оптимізації	Фізичний зміст параметра оптимізації
1	Y <sub>1</sub>	Швидкість буріння, V <sub>бур</sub> , м/хвил.
2	Y <sub>2</sub>	Енергоємність буріння, E <sub>бур</sub> , мДж/м
3	Y <sub>3</sub>	Рівень вібрацій на патроні обертача бурового станка, U, дБа

Таблиця 4

Матриця плану експерименту

№ з.п.	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>
1	1	-1	-1	1	1	1
2	1	-1	0	0	1	0
3	1	-1	1	-1	1	1
4	1	0	-1	0	0	1
5	1	0	0	0	0	0
6	1	0	1	0	0	1
7	1	1	-1	-1	1	1
8	1	1	0	0	1	0
9	1	1	1	1	1	1

Для створеного плану експерименту (табл. 4) за методом найменших квадратів обчислено коефіцієнти рівнянь регресії за виразом (1)

$$b_i = (X^* \cdot X)^{-1} \cdot X^* \cdot Y, \quad (1)$$

де b<sub>i</sub> – коефіцієнт рівняння регресії; X – матриця плану експерименту; X\* – транспонована матриця плану експерименту; (X\*·X)<sup>-1</sup> – матриця, обернена до добутку матриці плану експерименту на його транспоновану матрицю; Y – вектор-стовпець результатів експерименту.

Обробка результатів експерименту і визначення коефіцієнтів рівнянь регресії з урахуванням їхньої значущості дозволили одержати поліноміальні моделі.

Статистичний аналіз отриманих результатів містить перевірку двох статистичних гіпотез:

– про значущість отриманих коефіцієнтів моделі;

– про адекватність представлення результатів експерименту здобутих рівняннями регресії [4], [5]. Коефіцієнти рівняння регресії підставлені в поліноміальну форму вигляду:

$$Y_1 = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2. \quad (2)$$

Для кожного з параметрів оптимізації за формулою (1) знайдено коефіцієнти регресії, які підставлені в рівняння (2). Рівняння регресії для кожного параметра оптимізації мають такий вигляд:

$$Y_1' = 0,423 + 0,058 \cdot X_1 + 0,109 \cdot X_2 - 0,008 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,002 \cdot X_1^2 - 0,033 \cdot X_2^2;$$

$$Y_2' = 5,2 - 1,133 \cdot X_1 - 0,45 \cdot X_2 + 0,1 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,2 \cdot X_1^2 + 0,05 \cdot X_2^2;$$

$$Y_3' = 34,889 - 0,333 \cdot X_1 + 1,166 \cdot X_2 + 0,25 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,333 \cdot X_1^2 + 0,167 \cdot X_2^2;$$

$$Y_1'' = 0,345 + 0,057 \cdot X_1 + 0,062 \cdot X_2 + 0,014 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,008 \cdot X_1^2 - 0,039 \cdot X_2^2;$$

$$Y_2'' = 4,655 - 0,517 \cdot X_1 + 1,0 \cdot X_2 - 0,25 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,117 \cdot X_1^2 - 0,133 \cdot X_2^2;$$

$$Y_3'' = 69,555 - 4,167 \cdot X_1 + 1,333 \cdot X_2 - 4,0 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,167 \cdot X_1^2 - 4,333 \cdot X_2^2.$$

Згідно з отриманими рівняннями регресії в тривимірному просторі побудовано діаграми поверхонь функцій відклику, які показують залежність відповідного параметра оптимізації, а саме:

– швидкість буріння V<sub>бур</sub>, м/хвил., розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30 (Y<sub>1</sub>') (рис. 3, а) та серійним тришарошковим долотом III АВ-215,9 Т-П (Y<sub>1</sub>'') (рис. 3, б) відповідно;

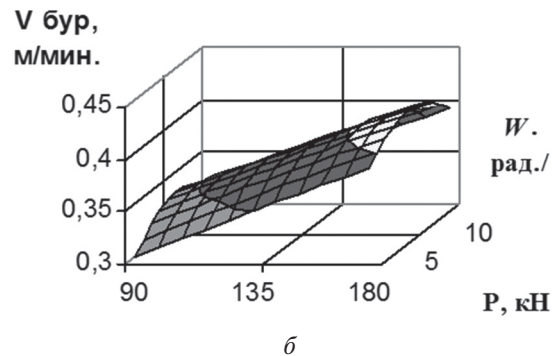
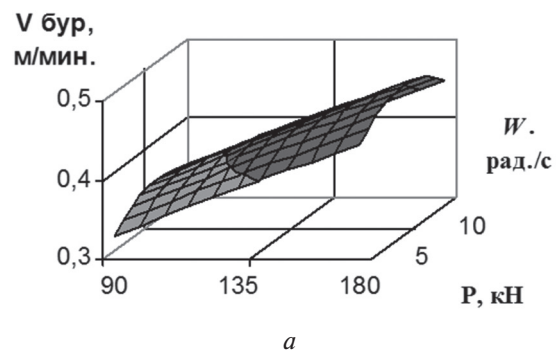


Рис. 3. Діаграма для швидкості буріння V<sub>бур</sub>, м/хвил.:

а – розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30 (Y<sub>1</sub>');

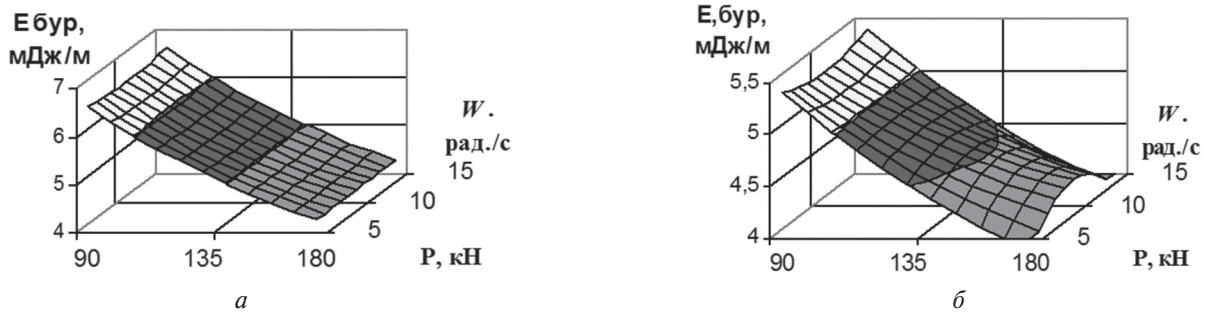
б – серійним тришарошковим долотом III АВ-215,9 Т-П (Y<sub>1</sub>'')

– енергоємність буріння E<sub>бур</sub>, мДж/м, розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30 (Y<sub>2</sub>') (рис. 4, а) та серійним тришарошковим долотом III АВ-215,9 Т-П (Y<sub>2</sub>'') (рис. 4, б) відповідно;

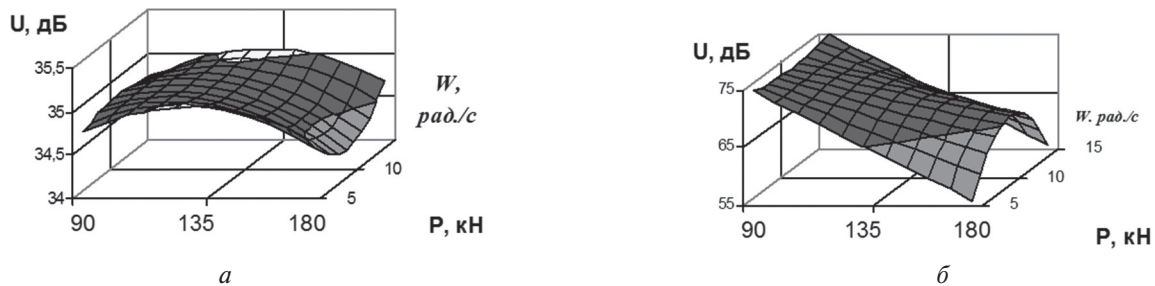
– рівень вібрацій на патроні обертача бурового станка під час буріння U, дБа, розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30 (Y<sub>3</sub>') (рис. 5, а) та серійним тришарошковим долотом III АВ-215,9 Т-П (Y<sub>3</sub>'') (рис. 5, б) відповідно;

від:  
– зусилля подачі бурового долота на забій P, кН (X<sub>1</sub>);  
– частоти обертання бурового станка W, рад./с. (X<sub>2</sub>).





**Рис. 4.** Діаграма для енергоємності буріння  $E_{\text{бур.}}$ , мДж/м:  
 а – розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30 ( $Y_2'$ );  
 б – серійним тришарошковим долотом ІІІ АВ-215,9 Т-П ( $Y_2''$ )



**Рис. 5.** Діаграма для рівня вібрацій на патроні обертача бурового станка під час буріння  $U$ , дБа:  
 а – розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30 ( $Y_3'$ );  
 б – серійним тришарошковим долотом ІІІ АВ-215,9 Т-П ( $Y_3''$ )

Режимні параметри буріння підривних свердловин наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Діаграмні значення швидкості буріння  $V_{\text{бур.}}$ , енергоємності буріння  $E_{\text{бур.}}$  та рівня вібрацій  $U$  для базового (серійного) ІІІ АВ-215,9 Т-П та розробленого (пропонованого) ОДВ-215,9-30 доліт

Показники	Зусилля подачі долота на забій, кН						
	ОДВ-215,9-30			ІІІ АВ-215,9 Т-П			
	90	135	180	90	135	180	
	Швидкість буріння $V_{\text{бур.}}$ , м/хвил.						
Частота обертання бурового станка, рад./с	5	0,330907	0,390056	0,445538	0,367334	0,383520	0,391434
	10	0,362889	0,422889	0,479222	0,396093	0,411040	0,418333
	15	0,330907	0,390056	0,445538	0,367334	0,383520	0,391434
		Енергоємність буріння $E_{\text{бур.}}$ , мДж/м					
	5	6,628333	5,250000	4,271667	5,405556	4,522222	3,872222
	10	6,533333	5,200000	4,266667	5,288889	4,655556	4,255556
	15	6,628333	5,250000	4,271667	5,405556	4,522222	3,872222
		Рівень вібрацій $U$ , дБа					
	5	34,76389	35,05056	34,68056	74,88889	65,22222	55,88889
	10	34,88889	34,88889	34,22222	73,88889	68,72889	65,55556
	15	34,76389	35,05056	34,68056	74,88889	65,22222	55,88889

За будь-якого значення зусилля подачі бурового долота на забій  $P$ , кН, ( $X_1$ ) всі параметри оптимізації режиму буріння будь-яким долотом при частоті обертання бурового станка  $W$ , ( $X_2$ ) = 5 рад./с та  $W$ , ( $X_2$ ) = 15 рад./с мають однакові величини (табл. 5). Однак при  $W$ , ( $X_2$ ) = 10 рад./с швидкість буріння  $V_{\text{бур.}}$ , м/хвил., ( $Y_1$ ) є максимальною, а енергоємність ( $Y_2'$ ) та рівень вібрацій на патроні обертача

бурового станка під час буріння  $U$ , дБа ( $Y_3'$ ) для розробленого одношарошкового долота з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30 – мінімальні.

Для серійного тришарошкового долота ІІІ АВ-215,9 Т-П (табл. 5) енергоємність ( $Y_2''$ )  $E_{\text{бур.}}$  = 5,288889 мДж/м та рівень вібрацій ( $Y_3''$ )  $U$  = 73,88889 дБа мінімальні лише при зусиллі подачі бурового долота на забій  $P$ , кН, ( $X_1$ ) = 90 кН, а

при  $P = 135$  кН та  $P = 180$  кН вони – максимальні ( $E_{\text{бур.}} = 4,655556$  мДж/м,  $E_{\text{бур.}} = 4,255556$  мДж/м та  $U = 68,72889$  дБа,  $U = 65,55556$  дБа відповідно).

Максимальна швидкість буріння розробленим (пропонованим) долотом ОДВ-215,9-30 становить  $0,479222$  м/хвил. при зусиллі подачі бурового долота на забій  $P, (X_1) = 180$  кН та частоті обертання бурового станка  $W, (X_2) = 10$  рад./с, що на  $12,7$  % вища за таку серійним тришарошковим долотом ІІ АВ-215,9 Т-П (табл. 5).

Мінімальні енергоємність буріння ( $E_{\text{бур.}} = 4,266667$  мДж/м.) та рівень вібрацій ( $U = 34,22222$  дБа) для пропонованого долота визначено за тих самих значеннях факторів варіювання (табл. 5). Рівень вібрацій для долота ОДВ-215,9-30 майже вдвічі нижчий, ніж для долота ІІ АВ-215,9 Т-П.

### Висновки

Вперше проведено математичне й комп'ютерне дослідження і визначено оптимальні режимні параметри буріння підривних свердловин у гірських масивах розробленим (пропонованим) одношарошковим долотом з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30, а саме: зусилля подачі бурового долота на забій має бути  $180$  кН, а частота обертання бурового станка –  $10$  рад./с. За таких умов швидкість

буріння максимальна, а енергоємність і рівень вібрацій – мінімальні.

Розроблене одношарошкове долото ОДВ-215,9-30 має суттєві переваги перед тришарошковим долотом ІІ АВ-215,9 Т-П, що серійно випускається: швидкість буріння на  $12,7$  % вище, а рівень вібрацій для долота ОДВ-215,9-30 майже вдвічі нижчий, ніж для долота ІІ АВ-215,9 Т-П.

### Список літератури:

1. Долота шарошкові. Технічні умови (ГОСТ 20692-2003, ІДТ):ДСТУ ГОСТ 20692:2004 – [чинний з 2004-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2004. – 14 с. – (Національний стандарт України).
2. Буткин, В.Д. Оценка способности шарошечных долот и режимов бурения шарошечными станками в производственных условиях / В.Д. Буткин, А.В. Гилев, С.Н. Вершинский // Территория нефтегаз. -2008. - № 2. – С. 32-35.
3. Голикова, Т.И. Свойства D-оптимальных планов и методы их построения / Т.И. Голикова, Н.Г. Микешина // Новые идеи в планировании эксперимента. – М.: 1969. – С. 34-39.
4. Кафаров, В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В. Кафаров. – М.: Химия, 1971. – 496 с.
5. Налимов, В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 30 с.

*Надійшла до редколегії 30.05.2017*

О.Б. Дудинова<sup>1</sup>, С.Г. Удовенко<sup>2</sup><sup>1</sup> ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, olga.dudinova@nure.ua<sup>2</sup> ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, serhii.udovenko@nure.ua

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ

Предложен метод сегментации и выделения контуров пространственных цифровых изображений, основанный на применении марковских моделей. Результаты тестирования подтверждают перспективность использования метода для компьютерного анализа пространственно - распределенных данных в геоинформационных системах.

СЕГМЕНТАЦИЯ, МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ, РАСТРОВЫЕ ДАННЫЕ, ГИС

### Введение

Для описания и анализа пространственных изображений в геоинформационных системах (ГИС) различного назначения и анализа цифровых изображений широко используются компьютерные методы, основанные на применении растровых и векторных моделей [1]. Растровая модель основана на представлении графической информации в виде матрицы или сети ячеек. Одной из основных задач обработки и анализа пространственных изображений является сегментация, т.е. разделение изображения на области, для которых выполняется определенный критерий однородности, например, выделение на изображении областей приблизительно одинаковой яркости. Понятие области изображения используется для определения связанной группы элементов изображения, имеющих определенный общий признак. Сегментация графических объектов непосредственно связана с выделением границ (контуров сегментов) в растровых изображениях при обработке спутниковых и аэроснимков в современных ГИС. Результаты такой обработки используются в процессе решения ряда прикладных задач, связанных, в частности, с распознаванием образов [2].

Алгоритмы выделения контуров сегментов и привязки их к существенным элементам изображения называют детекторами границ (edge detector) [3]. Детекторы границ используют относительно локальные фрагменты изображения, на основании анализа которых делается вывод о наличии краевых точек – точек изображения, в которых яркость изменяется особенно сильно. Совокупность краевых точек формирует края областей изображения.

Большинство существующих методов обработки пространственных изображений, полученных с помощью аэрокосмической съемки, не используют контекстные процедуры классификации. В то же время получили распространение теоретические исследования в этой области, в частности, работы, посвященные контекстной классификации с пространственными ограничениями на основе марковского моделирования [4].

Статистические методы состоят в определении границ решения, разделяющих пиксельное

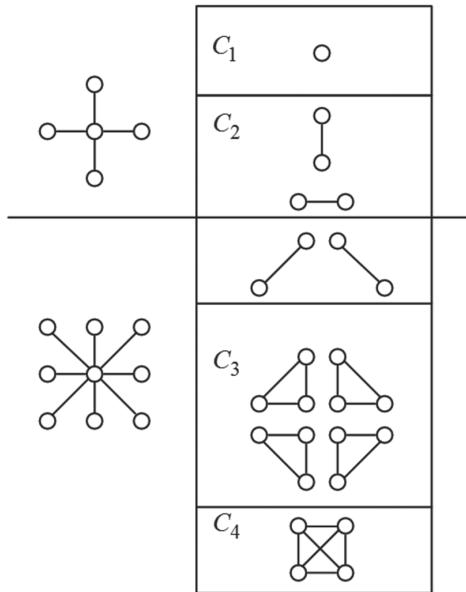
пространство на различные этикетированные зоны с помощью вероятностного моделирования пикселей и оценивания расстояний, ассоциируемых с таким моделированием. Дальнейшая классификация может осуществляться непосредственно для каждого пикселя с нахождением зоны, к которой он принадлежит, или по более сложным методам, анализирующим окрестность каждого пикселя с помощью марковских полей (Markov random field, MRF), что позволяет принимать во внимание пространственный контекст для получения более регулярных классификаций. Методы MRF отличаются от классических методов классификации учетом локальных взаимодействий между каждым пикселем и его соседями (окрестными пикселями) для определения различных районов изображения [5]. Модель MRF, которая предполагает, что изображение может быть представлено полем Маркова, требует использования итеративных методов типа «квантователь Гиббса» для определения закона поля; кроме того, возможно применение байесовских схем вычислений (с оцениванием типа MAP, MPM или рекурсивных алгоритмов).

Целью настоящей работы является разработка и тестирование метода сегментации и выделения контуров пространственных цифровых изображений, основанного на применении марковских моделей.

### 1. Марковская модель растровых изображений

Представим изображение как прямоугольную решетку, содержащую  $S$  пикселей. Каждому пикселю соответствует скалярный дескриптор  $\lambda$ , представляющий состояние пикселя и принимающий значения в пространстве состояний  $E$ . Для задания локальных взаимодействий надо структурировать пространственные отношения между различными пикселями сети. Для этого множеству  $S$  поставим в соответствие систему окрестностей  $V_s$  определяемую следующим образом:  $V_s$  включает такие элементы  $k$ , что  $s \notin V_s$ , а  $k \in V_s$  и  $s \in V_k$ . Заданной системе окрестностей соответствует набор клик, содержащих наборы соседних точек решетки, при этом порядок клики определяется количеством входящих в нее пикселей. Обозначим

как  $C$  набор клик, соответствующих окрестности  $V$ . Набор клик, ассоциируемый с системой окрестностей 2-го порядка, приведен на рис. 1.



**Рис. 1. Система пиксельных окрестностей 1-го и 2-го порядка**

Локальные взаимодействия соседних пикселей в градациях серого (или дескрипторов) могут определяться как потенциал клики. Пусть клике с соответствует потенциал  $U_c$ , значение которого зависит от уровня серого пикселей, входящих в клику. Тогда можно определить общую энергию изображения, как сумму потенциалов всех клик:

$$U = \sum_{c \in C} U_c, \tag{1}$$

а локальную энергию дуги как сумму потенциалов всех клик, к которым она принадлежит:

$$U_s = \sum_{c \in C/s \in C} U_c. \tag{2}$$

В марковском моделировании изображение рассматривается как реализация  $x$  случайного поля  $X = (X_s, X_k, \dots)$ . Уровень серого  $x_s$  для пикселя  $s$  определяет реализацию случайной переменной  $X_s$ . Глобальная вероятность для реализации  $x$  такого случайного поля позволяет отразить правдоподобие изображения и локальные условные вероятности величины  $s$  для оценки статистической связи между ее уровнем серого и остальной частью изображения, что позволяет использовать марковское моделирование для глобального случая, используя локальные модели. Эта марковская гипотеза является приемлемой для обработки спутниковых изображений, состоящих из однородных или текстурных зон.

Перспективность применения марковского моделирования для анализа изображений подтверждается теоремой Хаммерсли-Клиффорда, которая позволяет установить соответствие между полем Маркова и полем Гиббса, когда ни одна из реализаций  $X$  не имеет нулевую вероятность. Мера

Гиббса для энергетической функции  $U(x)$  соответствует вероятности, определенной на некотором множестве  $L$ . Для нормализации ансамбля реализаций функции  $U(x)$  используется разделительная функция следующего вида:

$$Z = \sum_{x \in L} \exp(-U(x)). \tag{3}$$

Тогда поле Гиббса связывается с системой окрестностей  $V$ , принимая свойства случайного поля  $X$ , вероятность которого является мерой Гиббса с системой окрестностей:

$$P(X = x) = \frac{1}{Z} \exp(-U(x)) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\sum_{c \in C} U_c(x)\right). \tag{4}$$

Таким образом, вероятность одной конфигурации зависит от набора локальных взаимодействий (на уровне клик). Чем больше общая энергия  $U(x)$ , тем меньше вероятность конфигурации. Это справедливо для следующих допущений:  $S$  – конечное множество, система окрестностей  $V$  ограничена, пространство состояний  $E$  является дискретным. Тогда случайное поле  $X$  является полем Маркова относительно системы окрестностей  $V$ , если оно совпадает с полем Гиббса, потенциалы которого ассоциированы с  $V$ .

В зависимости от системы окрестностей энергетическая функция  $U(x)$  может принимать различные формы. Например, для поля Маркова с четырехсвязной окрестностью эта функция определяется следующим образом:

$$U(x) = \sum_{c=(s) \in C_1} U_c(x_s) + \sum_{c=(s,k) \in C_2} U_c(x_s, x_k), \tag{5}$$

где  $C_1, C_2$  – клики 1-го и 2-го порядка соответственно.

Для синтеза реализаций поля Маркова при анализе изображений может быть использован так называемый квантователь Гиббса, позволяющий осуществлять итеративное преобразование изображений. На  $n$ -м шаге этого преобразования для выбранного пикселя  $s$  с учетом конфигурации системы окрестностей  $V_s$  для изображения на  $(n-1)$ -м шаге рассчитывается условная локальная вероятность

$$P(X_s = x_s / V_s) = \frac{\exp(-U_s(x_s / V_s))}{\sum_{\gamma \in E} \exp(-U_s(\gamma / V_s))}. \tag{6}$$

Рассчитанная вероятность используется для выбора очередного пикселя  $s$  на следующем шаге. Критерием останова алгоритма может быть осуществление заданного числа итераций. После квантования Гиббса получаем новую реализацию, используя методы определения наиболее вероятных конфигураций сегментов, соответствующих состояниям с минимальной энергией.

## 2. Детектирование контуров изображений с применением марковской модели

Рассмотрим задачу детектирования контуров в анализируемых растровых изображениях с применением описанной выше марковской модели.



Информация, содержащаяся в спутниковом изображении, представлена, как правило, в виде множества гомогенных фрагментов (зон), что надо принимать во внимание при кластеризации и классификации изображений. Применение марковских полей позволяет учитывать свойство влияния окрестности точки на саму точку и задавать таким образом зависимость между классом пикселей его соседей. Кроме того, марковские модели являются удобным инструментом для введения различных ограничений, связанных с пространственным и временным контекстами, определением контуров и т.п., благодаря возможности использования потенциальных функций.

На рис. 2 приведена схема предлагаемого алгоритма детектирования контуров в анализируемых изображениях, основанного на применении ИСМ-классификации со специфическими ограничениями сегментации и регуляризации.

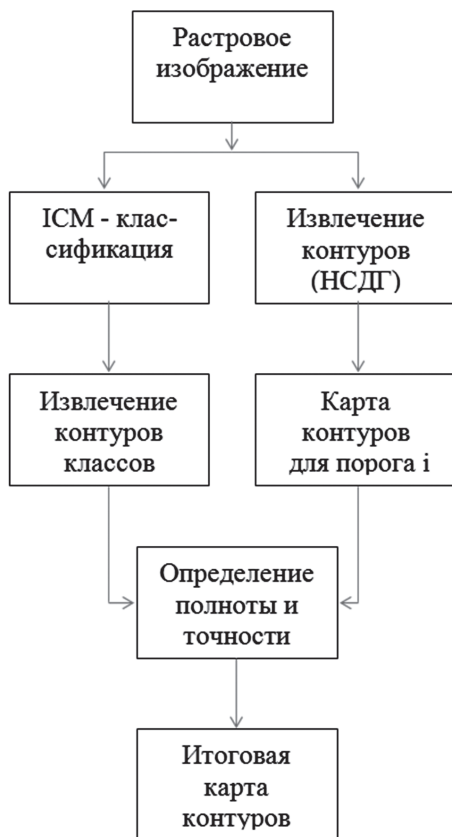


Рис. 2. Схема выделения контуров изображений

Опишем основные этапы общего алгоритма, реализующего предложенный метод.

Дискретные значения обрабатываемых изображений (наборы пикселей) формируются путем регулярной дискретизации с постоянным или переменным шагом в функции размерности изображения.

Входные данные параллельно обрабатываются в двух блоках алгоритма: блоке извлечения контуров классов (блок А) и блоке формирования карты контуров для различных пороговых значений (блок Б).

В блоке А на  $n$ -м шаге итеративного преобразования изображений для выбранного  $s$  (в соответствии с конфигурацией окрестности  $V_s$  для изображения на  $(n-1)$ -м шаге) рассчитывается условная локальная вероятность, которая используется для выбора очередного  $s$  на следующем шаге. Для вычисления наиболее вероятных конфигураций, соответствующих состояниям с минимальной энергией, применяется алгоритм ИСМ (Iterated Conditional Mode) [2]. На  $n$ -м этапе этого алгоритма осуществляются следующие операции:

- вычисляются локальные условные энергии  $P(X_s = \lambda / \hat{x}_r(k), r \in V_s)$  для всех возможных значений  $\lambda$  в пространстве  $E$ ;

- определяется изображение, соответствующее максимуму полученных локальных условных вероятностей:

$$\hat{x}_s(k+1) = \text{Arg max}_\lambda P(X_s = \lambda / \hat{x}_r(k), r \in V_s). \quad (7)$$

Для изображений в градациях серого ( $E = (0, 1, \dots, 255)$ ), формируемых с помощью ИСМ, можно использовать гауссовскую модель Маркова. Здесь система окрестностей имеет 4 или 8 связей, а  $U(x)$  принимает следующий вид:

$$U(x) = \beta \sum_{c=(s,k)} (x_s - x_k)^2 + \alpha \sum_{s \in S} (x_s - \mu_s)^2. \quad (8)$$

Первое слагаемое уравнения (8), соответствующее кликам 2-го порядка, является термом регуляризации, обеспечивающим малые разности уровней серого между соседними пикселями при  $\beta > 0$ . Второе слагаемое соответствует терму присоединения данных в случае, когда обрабатывается изображение с внешними данными. Отношение  $\alpha$  к  $\beta$  взвешивает значимость факторов присоединения данных и регуляризации.

Для извлечения контуров классов можно рассмотреть проблему в ракурсе байесовского подхода. Пусть мы имеем изображение  $y$ , которое можно рассматривать как реализацию случайного поля  $Y$ . Будем искать реализацию  $x$  классифицируемого изображения, моделируемого с помощью поля Маркова, где  $X$  – размеченное поле. Множества конфигураций не обязательно должны быть одинаковыми для  $X$  и  $Y$ . Целью классификации является получение реализации из  $X$  по наблюдениям данных  $y$ . Другими словами, речь идет о нахождении поля Маркова для  $X$ , где данные не являются полными, так как нет реализации из  $X$ .

Будем искать конфигурацию, максимизирующую вероятность  $X$  по отношению к данным  $y$ . В соответствии с правилом Байеса получаем выражение, в котором осуществляется анализ каждого из термов  $P(X = x / Y = y)$  и  $\mu$ , где  $\mu$  – константа, независимая от реализации  $X$ :

$$P(X = x / Y = y) = \frac{P(Y = y / X = x)P(X = x)}{P(Y = y)}. \quad (9)$$

Первый множитель в числителе (9) описывает процесс наблюдения и сбора данных. Предположим, что пиксели условно независимы:

$$P(Y = y / X = x) = \prod_S P(Y_S = y_S / X_S = x_S). \quad (10)$$

Применив для поля  $X$  марковскую гипотезу относительно окрестности для получения модели, получим:

$$P(X = x) = \frac{\exp(-U(x))}{Z}. \quad (11)$$

Используя классическую процедуру оценивания апостериорной вероятности, можно реализовать алгоритм минимизации энергетической функции с учетом ограничений, характерных для решаемой задачи.

Введем два дополнительных ограничения для процедуры сегментации: ограничение регуляризации и ограничение сегментации. Глобальная энергетическая функция, которая ассоциируется с пикселями изображений, может быть описана следующим образом:

$$U(x_s) = \sum U_1(x_s) + U_2(x_s). \quad (12)$$

Первая составляющая уравнения (9) связана с ограничением регуляризации (для восьмисвязной системы окрестностей) и задается суммой следующих потенциальных функций:

$$U_1(x_s) = \beta_1 \sum_{(s,k) \in C} \delta(x_s, x_k), \quad (13)$$

где  $\delta(x_s, x_k) = \begin{cases} -1 & \text{при } x_s = x_k, \\ 0 & \text{при } x_s \neq x_k \end{cases}$ ,  $\beta_1$  – параметр регуляризации.

Это ограничение позволяет сформировать непрерывные контуры классов для последующего анализа пикселей, относящихся к различным сегментам изображений. При этом создаются таблицы весовых коэффициентов, позволяющие в дальнейшем определить принадлежность выделяемых сегментов к одному из классов.

Для определения кусочно-линейных контуров будем использовать две процедуры. Первая процедура задает фиксированные (во время всей обработки) карты контуров  $L_g = \{l_g(i, j), 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\}$ . Вторая процедура предназначена для текущего формирования контуров  $L_c = \{l_c(i, j), 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\}$  в процессе обработки по следующему правилу:  $l_c(i, j) = 0$ , если два разделяемых пикселя принадлежат к одному классу, и  $l_c(i, j) = 1$  в противном случае. Таким образом, можно задать такую меру подобия между двумя рассмотренными типами контуров:

$$W(l_c(i, j), l_g(i, j)) = \begin{cases} 0, & \text{если } l_c(i, j) = l_g(i, j) \\ 1, & \text{если } l_c(i, j) \neq l_g(i, j) \end{cases}. \quad (14)$$

При этом энергетическая функция будет представлена следующим образом:

$$U(l_c(i, j), l_g(i, j)) = -\beta_g \sum_{(i,j) \in V_{ij}^g} W(l_c(i, j), l_g(i, j)).$$

Очевидно, что энергия класса уменьшается, если отнесение пикселя к этому классу не соответствует создаваемым контурам сегментов. Параметр

$\beta$  позволяет регулировать веса, задаваемые рассматриваемым ограничением.

Минимизацию энергетической функции можно осуществлять с применением так называемого параметра температуры  $T$ . Этот параметр имеет свой аналог в статистической физике (в частности, в термодинамике) и в рассматриваемом методе может использоваться для сглаживания процедуры поиска оптимальной конфигурации контуров классов и сегментов. Рассмотрим модифицированное распределение Гиббса с параметром температуры:

$$E(x / y) = \frac{1}{T} \cdot U(x_s) + f(y_s, \mu_{x_s}, \Sigma_{x_s}). \quad (15)$$

В предлагаемом методе надо уменьшать  $T$  от некоторого высокого значения до низкой температуры (ограничения). Слишком быстрое понижение провоцирует кристаллизацию в локальном минимуме энергии. Эти ограничения контролируются на каждой итерации параметром температуры. Начальная температура  $T_0$  выбирается повышенной, а затем регулярно уменьшается до стабилизации результатов, позволяющей выделить окрестность пикселя. Уменьшение температуры между двумя итерациями должно осуществляться медленно по наиболее эффективной схеме. Если же температуру уменьшать резко, возникает риск остановиться в локальном минимуме энергии (максимуме вероятности). Таким образом, надо избегать резких изменений температуры между двумя итерациями. Это можно сделать, изменяя  $T$  на каждой итерации следующим образом:

$$T_{i+1} = \frac{T_0}{\ln(i+1)} \quad \text{или} \quad T_{i+1} = \frac{T_i}{\ln(i+1)}. \quad (16)$$

На практике можно использовать следующую упрощенную формулу:

$$T_{i+1} = \alpha \cdot T_i, \quad 0.8 \leq \alpha \leq 0.9. \quad (17)$$

Вторая составляющая уравнения (9) связана с контурами и окрестностями сегментов изображения.

Для первичного детектирования контуров сегмента в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2, целесообразно использовать нейросетевой детектор границ (НСДГ), описанный в [6]. В модифицированную версию НСДГ включена процедура определения порога сегментации. Основная процедура детектирования контуров сегментов в НСДГ состоит в представлении изображения с помощью окон, определяющих зону сегмента. Оконный оператор, реализуемый с применением нейросетевого блока, обрабатывает пиксели окна, чтобы определить, присутствует ли в нем признак выбранного атрибута. Этот оператор вычисляет разность между средними значениями с каждой стороны окна от центрального пикселя, осуществляя экспоненциальное взвешивание. При этом реализуется сглаживание, контролируемое контурами карты сегментации, и формируется таблица

весов на каждой итерации, чтобы определить доминантные классы для каждого сегмента. Для выбора порога сегментации изображения контуров используем параметры точности (F1) и полноты (F2), особенности применения которых описаны в работе [7].

Итоговая карта контуров соответствует наиболее приемлемому варианту сегментации исходного изображения.

### 3. Результаты тестирования

Разработанный в соответствии с предложенным подходом программный модуль компьютерного анализа растровых изображений, реализованный в среде Scilab, включает в себя два основных блока: блока извлечения контуров классов (блок А) и блока формирования карты контуров для различных пороговых значений (блок Б). На вход модуля поступают оцифрованные изображения в градациях серого. В блоке А осуществляется итеративное преобразование изображений для текущего пикселя (в соответствии с конфигурацией окрестности для изображения на предыдущем шаге) и рассчитывается условная локальная вероятность, которая используется для выбора очередного пикселя на следующем шаге и формирования значений глобальной энергетической функции. Алгоритм учитывает ограничения регуляризации и сегментации. В блоке Б осуществляется детектирование контуров сегментов с помощью нейросетевого детектора НСДГ.

Для тестирования разработанного модуля использовались пространственные данные из базы данных ГИС экологического контроля, представленные растровой моделью [6].

На рис. 3 приведены результаты выбора порога сегментации по оцениванию значений параметра полноты (F1) и точности (F2). Отметим, что при пороге выше 10 точность повышается, а полнота снижается. Наиболее сбалансированное значение порога соответствует интервалу от 9 до 11.

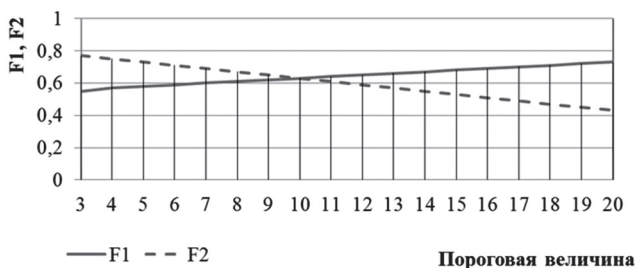


Рис. 3. Выбор порога сегментации

Качество сегментации и выделения контуров определялось количеством неправильно распознанных пикселей каждого класса, взвешенным

на общее количество пикселей этого класса на тестовом изображении. Было установлено, что оно пропорционально значению F3, определяемому следующим отношением:  $F3 = F1 \cdot F2 / ((F1 + F2) - F1 \cdot F2)$ .

Результаты моделирования подтверждают перспективность предложенного метода для компьютерного анализа растровых статических изображений в ГИС-приложениях.

### Выводы

Рассмотренный подход к компьютерному анализу изображений с использованием марковских моделей позволяет учитывать характер окрестности анализируемого пикселя и задавать таким образом зависимость между классами соседних пикселей. Кроме того, марковские модели являются удобным инструментом для введения различных ограничений, связанных, в частности, с определением контуров сегментов, благодаря возможности использования потенциальных функций. Результаты тестирования подтвердили достоинства применения марковских моделей при обработке растровых изображений в ГИС-приложениях.

Перспективным развитием предлагаемого подхода является рассмотрение задач его практического применения в ГИС экологического мониторинга для анализа пространственно-распределенных данных.

### Список литературы:

1. Куссуль Н. М. Геоінформаційна інфраструктура моніторингу навколишнього середовища та надзвичайних ситуацій / Н. М. Куссуль, С. В. Скакун, А. Ю. Шелестов // Наука та інновації – 2010. – Том 6, № 4. – С. 21-28.
2. Беяков С. Л. Комбинирование картографических изображений / С. Л. Беяков // Информационные технологии. – 2005. – С. 36-43.
3. Gonzalez R. C. Digital Image Processing / R. C. Gonzalez, R. E. Wood//. Prentice Hall - 2008. – 954 p.
4. Петюшко А.А. О марковских случайных полях и их связи с цепями Маркова / А.А. Петюшко // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. – 2010. – том 14, № 1-4, С. 225-236.
5. Boykov Y. Interactive Graph Cuts for Optimal Boundary & Region Segmentation of Objects in N-D images / Y. Boykov, M.P. Jolly // Proc. of International Conference on Computer Vision, (ICCV), vol. I, pp. 105-112, 2001.
6. Дудинова О.Б. Метод неросетевой обработки зашумленных пространственных данных- / О.Б. Дудинова, С.Г. Удовенко // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2015. – Вып. 173 – С. 14-23.
7. Idbraim S. An automatic system for urban road extraction from satellite and aerial images / S. Idbraim, D. Mammas, D. Aboutajdine, D. Ducrot // Wseas transaction on signal processing/ – 2008/ – Issue 10 – Vol 4 – P. 563-572.

Поступила в редколлегию 21.03.2017



УДК 004.891.3

О.В. Чалая<sup>1</sup><sup>1</sup>ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, oksana.chala@nure.ua

## ПРИНЦИП ТА МЕТОД ЕВОЛЮЦІЙНОЇ ПОБУДОВИ БАЗИ ЗНАНЬ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЛОГІВ ІС ПРОЦЕСНОГО УПРАВЛІННЯ

Запропоновано принцип еволюційного формування бази знань на основі аналізу логів інформаційної системи процесного управління. Принцип базується на поєднанні водоспадної та еволюційної стратегій та передбачає використання як формалізованих знань, так і екстерналізованих персональних знань виконавців для побудови бази знань. Формалізовані знання включають до складу бази знань при проектуванні або проведенні реінжиніринга бізнес-процесу. Екстерналізація знань виконавців виконується на основі аналізу логів, що містять у собі запис поведінки бізнес-процесу. Використання даного принципу дає можливість підвищити ефективність процесного управління за рахунок включення до бази знань персональних знань виконавців бізнес-процесу. На основі розробленого принципу запропоновано метод автоматизованої побудови бази знань інформаційної системи процесного управління шляхом виявлення зв'язків між атрибутами артефактів бізнес-процесу, а також значеннями цих атрибутів. Метод дає можливість на основі аналізу поведінки процесу отримати залежності між артефактами, що задають обмеження та правила вибору дій процесу, та включити ці залежності до складу бази знань.

ЗНАННЯ, БАЗА ЗНАНЬ, ЗНАННЯ-ЄМНИЙ БІЗНЕС-ПРОЦЕС, КОНТЕКСТ, АРТЕФАКТ

### Вступ

Інформаційні системи (ІС) процесного управління потребують структуризації діяльності підприємства у вигляді послідовностей дій з виробництва продукції та послуг, а також побудови моделей множини бізнес-процесів (БП) організації. Кожен з бізнес-процесів описує послідовність дій, необхідну для вирішення відповідної функціональної задачі без врахування зв'язку з організаційною структурою підприємства [1].

Процесне управління підприємством передбачає управління бізнес-процесами з використанням їх моделей. Традиційно модель бізнес-процесу має вигляд workflow - графа [2]. При використанні процесного підходу реалізується управління по відхиленню. Необхідною умовою такого управління є адекватність моделей бізнес-процесів в умовах постійних змін вимог ринку, складу виконавців, заміни ресурсів процесу.

Підтримка адекватності моделі для класу знання-ємних бізнес-процесів (ЗБП) пов'язана зі значними труднощами, тому що такі процеси можуть змінювати задану в моделі послідовність дій на основі контекстно-орієнтованих рішень виконавців [3, 4]. Це приводить до виникнення невідповідності між моделлю та бізнес-процесом, що виконується.

При ухваленні рішень про зміну ходу виконання бізнес-процесу виконавці використовують як загальнодоступні явні правила, так і персональні знання і досвід [4, 5]. Персональні знання зазвичай містять у собі неформалізовані правила та шаблони дій і тому не можуть бути апріорно включені в модель бізнес-процесу при її проектуванні.

Таким чином, при реалізації управління гнучкими бізнес-процесам, що адаптуються на основі знань, актуальною є проблема автоматизованої

побудови бази знань для забезпечення адекватності моделей гнучких процесів.

Для вирішення даної проблеми необхідно, по-перше, представити знання бізнес-процесу окремо від його традиційної workflow – моделі. По-друге, по мірі удосконалення ЗБП, необхідно проводити екстерналізацію знань виконавців – тобто виділити знання і представити їх у формальному вигляді, після чого доповнити базу знань інформаційної системи.

Задачі екстерналізації і формування бази знань вимагають розробки відповідних формальних принципів і підходів, що базуються на аналізі поведінки таких процесів. Можливість виділення розглянутих знань забезпечується тим, що до складу інформаційно-управляючої системи зазвичай входить модуль запису логів. Тому у системах процесного управління сліди застосування неявних знань виконавців відображаються у файлах логів бізнес-процесів. Це забезпечує умови для виявлення і подальшої формалізації неявних залежностей на основі аналізу логів БП методами інтелектуального аналізу процесів (process mining) [6].

Після перевірки виявлених залежностей ОПР вони можуть бути включені до складу бази знань інформаційно-управляючої системи. Проте питання побудови баз знань інформаційних систем процесного управління на основі аналізу логів процесів на сьогодні розроблені недостатньо. Зазначене свідчить про актуальність теми роботи.

### 1. Постановка задачі

Метою статті є розробка принципу та методу еволюційної побудови бази знань інформаційної системи процесного управління шляхом аналізу логів та подальшого виявлення закономірностей, що визначають обмеження та можливості вибору дій бізнес-процесу у конкретному контексті.



## 2. Операції з побудови представлення знань для ІС процесного управління

Гнучкі бізнес-процеси, що змінюються внаслідок використання знань виконавців, доцільно розділити на три складові [7,8]:

- контекст процесу;
- набір патернів, правил і обмежень, що визначають вибір дій в заданому контексті, з урахуванням поточного стану його елементів;
- набір послідовностей дій бізнес-процесу у вигляді його workflow — представлення (ланцюжків робіт).

Контекст містить у собі набір об'єктів предметної області, що використовуються бізнес-процесом, або впливають на його виконання. Такі об'єкти зазвичай іменуються артефактами БП. Стан контексту визначається станом артефактів, а також поточними взаємозв'язками між ними [9,10].

У відповідності до наведеної структури БП, представлення знань  $Kr$  ІС процесного управління повинно містити у собі як статичні залежності між атрибутами артефактів, так і змінні залежності між значеннями цих атрибутів. Перші доцільно розглядати як обмеження на виконання процесу, а другі — як правила вибору дій.

Наприклад, повторення атрибутів «Роль виконавця» і «Найменування операції» для всіх подій у вхідних даних свідчить об існування зв'язку між артефактами «Роль» і «Операція» у рамках опису бізнес-процесу. Тобто при побудові моделі бізнес-процесу для кожної дії необхідно визначити роль виконавця.

З іншого боку, зв'язки між найменуваннями операцій і конкретною роллю, а також ім'ям виконавця вказують на можливість вибору конкретного працівника на певну роль при виконанні заданої операції бізнес-процесу.

Слід зазначити, що окремі дії процесу також можуть бути представлені як артефакти, які використовує процес. Така типізація дозволяє єдиним чином представити як залежності контексту, так і правила вибору дій процесу.

У відповідності до наведених особливостей використання знань при процесному управлінні, представлення знань складається з наступних елементів:

$$Kr = \{Af, Rl, Cn, Rl^*, Cn^*\}, \quad (1)$$

де  $Cn$  — залежності, що визначають обмеження на виконання бізнес-процесу;  $Rl$  — правила, що задають вибір конкретних артефактів (наприклад, виконавців, дій) при виконанні процесу,  $Rl^*$  — інтегровані правила;  $Cn^*$  — інтегровані обмеження.

Обмеження та правила задаються через значення атрибутів артефактів:

$$\begin{aligned} Cn_d &\equiv a_{ij} \Rightarrow a_{lk}, \\ Rl_z &\equiv v_{ij}^s \Rightarrow v_{lk}^n \quad | \\ \forall v_{ij}^s \exists t_{sm} \wedge \forall v_{lk}^n \exists t_{nm}, t_{sm}, t_{nm} &\in T \end{aligned} \quad (2)$$

де  $t_{sm}$  — мітка часу події логу, в описі якої вказано значення  $v_{ij}^s$  атрибуту  $a_{ij}$ ;  $t_{nm}$  — мітка часу події логу, в описі якої вказано значення  $v_{lk}^n$  атрибуту  $a_{lk}$ .

Інтегровані правила та обмеження об'єднують кілька залежностей між атрибутами артефакту.

Для формування наведеного представлення знань  $Kr$  використовуються наступні операції:

- виявлення атрибутів артефактів на основі аналізу подій логу інформаційної системи;
- екстерналізація контекстно-орієнтованих знань про управління бізнес-процесом у вигляді залежностей між артефактами і їх атрибутами;
- установка пріоритетів для залежностей в базі знань;
- ітеративне узагальнення та доповнення залежностей.

Представлений вибір операцій базується як на особливостях вхідних даних, представлених у формі логу процесу, так і на ітеративному характері процесного управління: після завершення бізнес-процесу виконується аналіз його результатів та, при необхідності, коригування моделі.

Знову процес запускається вже після уточнення моделі.

Операція виявлення атрибутів дозволяє встановити зв'язок між вхідними атрибутами подій логу і вихідними артефактами та їх атрибутами. У разі нестандартних логів може знадобитися введення додаткової інформації або уточнення наявних атрибутів безпосередньо користувачем.

Наприклад, в описі подій початкового логу може бути вказана роль виконавця «*org:role*» або оброблюваний об'єкт «*product*» в закодованому виді, як показано на рис. 1.

```
<string key=>org:role value=>A2_1/>,
<string key=>product value=>PROD542/>
```

Рис. 1. Приклад неповної початкової інформації

У цьому прикладі семантика «*A2\_1*», «*PROD542*» абсолютно неочевидна, що вимагає введення додаткової інформації для розшифровки приведених кодів.

Операція узагальнення знань про предметну область полягає в інтеграції залежностей, які є істинними у рамках конкретного домену. Приклад інтегрованої залежності наведений на рис.2.

*ВИКОНАВЕЦЬ.Роль.І'мя*  
зазвичай виконує операцію  
*ОПЕРАЦІЯ.Найменування*  
бізнес-процесу  
*ПРОЦЕС.Назва.*

Рис. 2. Приклад інтегральної залежності

У цьому ілюстративному прикладі представлені об'єкти *ВИКОНАВЕЦЬ*, *ОПЕРАЦІЯ*, *ПРОЦЕС*, між атрибутами яких існує загальна залежність.

Ця залежність дозволяє доповнювати процесну модель у разі неповноти початкових даних. Так, якщо в описі подій конкретного логу, або подій

окремої траси логу пропущені атрибути з ім'ям виконавця, то інформація про виконавця відсутня в моделі процесу. Тоді приведене загальне правило дозволяє приймати рішення по виконанню *ОПЕРАЦІЯ.Найменування*, призначенню виконавцем *ВИКОНАВЕЦЬ.Ім'я*, що виконує роль *ВИКОНАВЕЦЬ.Роль*.

Операція установки пріоритетів для розміщених у базі знань залежностей реалізується через визначення вагових відношень між артефактами і їх атрибутами. У загальному випадку для встановлення таких коефіцієнтів можна використати два підходи:

– значення коефіцієнтів для залежностей визначає користувач відповідно до свого розуміння важливості цього правила для відповідної задачі процесного управління;

– значення вагових коефіцієнтів задаються за допомогою одного з відомих методів навчання.

При рішенні завдань процесного управління доцільним представляється застосувати комбінацію обох підходів. Спочатку в якості навчальної вибірки використовується один або декілька логів. Навчання на основі трас одного логу дозволяє адаптувати отримані залежності до специфіки конкретного підприємства або підрозділу підприємства. Використання в якості навчальної вибірки декількох логів дозволяє узагальнити значення вагових коефіцієнтів для групи аналогічних бізнес-процесів в заданій предметній області.

Надалі результати навчання можуть бути відкориговані ЛПП з урахуванням персональних контекстно-залежних знань.

Операція ітеративного уточнення і доповнення залежностей використовується при рішенні наступних задач:

– усунення помилок і неточностей у виділених залежностях;

– підвищення адекватності формальних знань про бізнес-процеси у разі використання персональних знань і досвіду виконавців при управлінні бізнес-процесом.

Як було показано раніше, зміна ходу процесу в результаті застосування персональних знань фіксується у лозі. Кожна нова реалізація записується у вигляді окремої траси логу. Порівняння трас дозволяє виділити залежності між артефактами і їх атрибутами, які сформувалися внаслідок управлінських рішень виконавців. Виконання перших трьох операцій по формуванню представлення знань дозволяє доповнити БЗ і тим самим підвищити адекватність процесної моделі.

### **3. Метод побудови бази знань для процесного управління**

У відповідності до традиційного життєвого циклу бізнес-процесу вимоги до БЗ відомі апріорно. Відповідно, структура процесу повністю, з

урахуванням усіх деталей, задається при його побудові/реінжинірингу і не змінюється під час його виконання.

При адаптації та удосконаленні таких процесів реалізується інкрементний підхід. Останній використовує модифікацію відомої водоспадної стратегії, що застосовується в області розробки програмного забезпечення. Удосконалення моделі процесу виконується після завершення однієї або декількох його реалізацій, за результатами оцінки ефективності БП.

Для знання-ємних процесів характерна зміна послідовності дій внаслідок використання неформалізованих знань виконавців. Використання виконавцями своїх знань та досвіду при управлінні бізнес-процесами зазвичай виникає після змін у контексті виконання дій БП. Останні виникають внаслідок неконтрольованого впливу зовнішнього середовища, зміни вимог до процесу, тощо.

В результаті застосування таких персональних знань реальний процес буде відрізнятися від його моделі, що потребує постійного поповнення бази знань.

Таке поповнення може бути реалізовано на основі запропонованого принципу еволюційної побудови бази знань для процесного управління.

Принцип еволюційної побудови бази знань заснований на поєднанні водоспадної і еволюційної стратегій. Еволюційна стратегія спрямована на ітеративне розширення можливостей процесного управління шляхом включення до бази знань нових залежностей, виявлених під час виконання процесу. Останні відображають невідомі раніше взаємозв'язку між елементами контексту і діями бізнес-процесу.

Запропонований принцип ґрунтується на тому, що лог інформаційної системи процесного управління поповнюється по мірі виконання бізнес-процесу. Кожна дія процесу фіксується у вигляді події логу. Сукупність подій для однієї реалізації процесу складає трасу. Порівняння поточної траси процесу з поточною моделлю процесу, а також з іншими трасами логу дає можливість виявити відхилення в ході процесу, яке виникло внаслідок застосування виконавцями своїх знань для зміни ходу процесу.

Після виявлення відхилення необхідно провести його аналіз, тобто виявити (доповнити) залежності між артефактами контексту, що можуть бути причиною для зміни ходу виконання БП.

Семантика еволюційної стратегії в рамках запропонованого принципу може бути відображена у вигляді наступного правила:

#### **ЯКЩО**

1) послідовність подій поточної траси є унікальною для всіх інших трас логу даного бізнес-процесу;

2) дана траса не відображена в моделі БП;

ТО

1) виділити унікальну підмножину подій траси логу;

2) на основі порівняння значень атрибутів відфільтрованої множини подій та існуючих трас логу виявити або уточнити обмеження та правила вибору дій бізнес-процесу;

3) на основі рішення ОПР доповнити базу знань.

Еволюційний характер принципу підтверджується тим, що наведене правило може бути виконано циклічно по мірі реалізації бізнес-процесу. При зміні останнього внаслідок врахування виконавцями нових вимог або зовнішніх впливів база знань буде постійно поповнюватись.

На основі запропонованого принципу розроблено метод побудови бази знань системи процесного управління.

Розроблений метод використовує операції виявлення атрибутів артефактів і зв'язків між ними та реалізує принцип інкрементного поповнення бази знань. Загальна ідея методу полягає у виявленні залежностей на різних рівнях бізнес-процесу:

– на рівні послідовності операцій бізнес-процесу виявляються залежності між подіями логу; події та операції

– на рівні контексту бізнес-процесу визначаються обмеження на виконання його дій;

– на рівні правил визначаються патерни вибору дій в залежності від поточного стану контексту.

Метод містить у собі наступні ключові етапи:

Етап 1. Виявлення артефактів та їх атрибутів на основі аналізу логу бізнес-процесу [11].

На даному етапі виявляються підмножини подій трас логу, між атрибутами яких можуть існувати залежності, а також значення атрибутів цих подій. Події логу фіксують виконання відповідних дій бізнес-процесу. В файлі логу при описі подій вказуються атрибути артефактів бізнес-процесу, які були використані при виконанні відповідних дій. Тобто опис подій логу містить інформацію не лише про виконані дії, а й про контекст цих дій. Це дозволяє визначити відповідні артефакти та значення їх атрибутів з мітками часу.

Етап 2. Побудова правил та обмежень по управлінню бізнес-процесами з використанням відомих формалізованих знань. Як було показано раніше, при управлінні бізнес-процесами використовуються як документовані та формалізовані знання, так і персональні знання виконавців. На даному етапі побудови БЗ використовуються формалізовані знання і тому реалізуються традиційні підходи інженерії знань.

Етап 3. Побудова прототипів правил та обмежень за результатами аналізу логів. Задача даного етапу полягає в попередньому виявленні залежностей, що відображають персональні знання виконавців, які були використані при адаптації/удосконаленні бізнес-процесу у відповідності до

поточного стану контексту. Побудова прототипів виконується на основі фактор-графу. Фактор-граф дозволяє визначити взаємозв'язки між декількома атрибутами артефактів (значеннями цих атрибутів). Приклади зв'язків: послідовний зв'язок, ідентичні атрибути, тощо. Змінні, що відповідають вершинам фактор-графу можуть бути двох типів: з відомим значенням; зі значенням, яке потрібно знайти. Для останніх визначається умовна ймовірність кожного кандидата.

Результуючий граф із визначеними умовними ймовірностями є прототипом правил та обмежень по управлінню бізнес-процесами.

Етап 4. Визначення вагових коефіцієнтів для отриманих на етапі 3 правил та обмежень. При обчисленні вагових коефіцієнтів враховується кількість появ правила в трасах логу.

Етап 5. Відбір отриманих правил ОПР. Результатом даного етапу є впорядкований за ваговими коефіцієнтами набір правил вибору дій та/або обмежень на допустимі дії, які в подальшому можуть бути внесені в базу знань.

Наведений метод дозволяє знаходити правила на різних рівнях знання-ємного бізнес-процесу в залежності від підмножини вхідних даних.

В тому випадку, якщо використовуються події логу зі вказаними в атрибутах назвами відповідних дій процесу, то результатами методу є залежності між діями на рівні workflow бізнес-процесу.

При використанні назв атрибутів артефактів результатом методу є залежності між артефактами контексту, які доцільно розглядати як обмеження на виконання бізнес-процесу.

Якщо у якості вхідних даних використовуються значення атрибутів артефактів, то результатом методу є контекстно-орієнтовані правила вибору дій бізнес-процесу.

## Висновок

Запропоновано принцип еволюційного формування бази знань на основі аналізу логів інформаційної системи процесного управління. Принцип базується на поєднанні водоспадної та еволюційної стратегій та передбачає використання як формалізованих знань, так і екстерналізованих персональних знань виконавців для побудови БЗ.

Формалізовані знання включають до складу бази знань при проектуванні або реінжинірингу бізнес-процесу. Екстерналізація знань виконавців виконується на основі аналізу логів, що містять у собі запис поведінки БП.

Використання даного принципу дає можливість підвищити ефективність процесного управління за рахунок включення до бази знань персональних знань виконавців бізнес-процесу.

На основі розробленого принципу запропоновано метод автоматизованої побудови бази знань ІС процесного управління шляхом виявлення

зв'язків між атрибутами артефактів бізнес-процесу, а також значеннями цих атрибутів. Метод передбачає визначення умовної ймовірності значень атрибутів, що входять до складу патерна або правила, а також визначення вагових коефіцієнтів отриманих патернів. Метод дає можливість на основі аналізу поведінки процесу отримати залежності між артефактами, що задають обмеження та правила вибору дій процесу, та включити ці залежності до складу бази знань.

#### Список літератури:

1. *Weske M.* Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures. Second Edition/ M. Weske. – Springer, 2012. – 403 p. 2. *Vom Brocke, J.* Handbook on Business Process Management 1. Introduction, Methods, and Information Systems / J. vom Brocke, M. Rosemann. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – 709 p. 3. *Gronau N.* KMDL-Capturing, Analysing and Improving Knowledge-Intensive Business Processes / N. Gronau, C. Müller, R. Korf // Journal of Universal Computer Science. - 2005. – №11(4). – pp. 452-472. 4. *Gronau, N.* Modeling and Analyzing knowledge intensive business processes with KMDL: Comprehensive insights into theory and practice (English) / N. Gronau. –

Gito, 2012. – 522 p. 5. *Polanyi M.* Personal Knowledge: Towards a Post-Critical Philosophy/ M. Polanyi. – University of Chicago Press, 1958. – 493 p. 6. *Van der Aalst, W. M. P.* Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes / W. M. P. Van der Aalst. – Springer Berlin Heidelberg, 2011. – 352 p. 7. *Чалая О.В.* Структуризация знание-емких бизнес-процессов // Системы управління навігації та зв'язку. – П.: ПолтНТУ, 2015. – Вип.2 (35) – С. 151-155. 8. *Левыкин В. М.* Модель знание-емкого бизнес-процесса для задач интеллектуального анализа процессов // В. М. Левыкин, О.В. Чалая // УСиМ, 2016, №6. – С. 59-66. 9. *Cohn D.* Business artifacts: A data-centric approach to modeling business operations and processes/ Cohn D., Hull R. // IEEE Data Eng. Bull. - 2009. – №32. – pp. 3-9. 10. *Bhattacharya K.* Artifact-centered operational modeling: Lessons from customer engagements/ K. Bhattacharya, N. S. Caswell, S. Kumaran, A. Nigam, F. Y. Wu // IBM Systems Journal. - 2007. – №46 (4). – pp. 703-721. 11. *Левыкин В. М.* Выделение элементов контекста знание-емких бизнес-процессов на основе анализа логов // В. М. Левыкин, О.В. Чалая // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 5/2(31). – С. 65-71.

*Надійшла до редколегії 05.04.2017*



УДК 004.852

О.Г. Руденко<sup>1</sup>, О.О. Безсонов<sup>2</sup>, Д.Г. Смерчинський<sup>3</sup><sup>1</sup> ХНЭУ, г. Харьков, Украина, oleg.rudenko@hneu.ua<sup>2</sup> ХНЭУ, г. Харьков, Украина, oleksandr.bezsonov@hneu.ua<sup>3</sup> ХНЭУ, г. Харьков, Украина, hxdiviatorxx@gmail.com

## РОЗПІЗНАВАННЯ ЕМОЦІЙНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗГОРТКОВИХ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Запропоновано метод розпізнавання емоційного стану людини за допомогою згорткових штучних нейронних мереж, заснований на виділенні локальних ознак. Результати тестування підтверджують перспективність використання розробленого методу для комп'ютерного моніторингу виразів обличчя задля перевірки реакції людини та різноманітні події.

РОЗПІЗНАВАННЯ, ЗГОРТКОВА НЕЙРОННА МЕРЕЖА, ЕМОЦІЙНИЙ СТАН, ЛОКАЛІЗАЦІЯ

### Вступ

Розпізнавання візуальних образів є одним з найважливіших компонентів систем управління та обробки інформації, автоматизованих систем та систем прийняття рішень. Завдання, пов'язані з класифікацією і ідентифікацією предметів, явищ і сигналів, що характеризуються кінцевим набором деяких властивостей і ознак виникають в таких галузях як робототехніка, інформаційний пошук, моніторинг та аналіз візуальних даних, дослідження штучного інтелекту. Головним завданням штучного інтелекту є побудова інтелектуальних інформаційних систем, які володіли б рівнем ефективності рішень неформалізованих задач, які можна порівняти з людськими можливостями або таких, що переважають їх.

При взаємодії з іншими людьми обличчя людини є важливим джерелом інформації. Вираз обличчя, міміка, жестикуляція при розмові, рухи головою є зручним, природним і способом передачі інформації. Нездатність комп'ютера з одного боку сприйняти, а з іншого – відтворити природні для людини способи спілкування ускладнює передачу і сприймання інформації при роботі з ЕОМ. Для досягнення мети розпізнавання комп'ютером рухів голови, міміки, зміни виразу обличчя потрібно реалізувати стійкі алгоритми аналізу і класифікації цифрового зображення обличчя людини.

Такі алгоритми можуть виконувати широкий спектр завдань комерційного і некомерційного характеру. Прикладом застосування таких алгоритмів може слугувати моніторинг виразів обличчя задля перевірки реакції людини на різні оголошення, рекламні анонси кінострічок, книг, телешоу. Спеціалісти вважають, що використання подібних програм для роботи з фокус-групами значно дешевше і ефективніше, ніж соціальні опитування.

На сьогоднішній день ще не існує алгоритму, який міг би ідентифікувати міміку та емоції людини з 100% точністю. Тим не менше, вже зараз можна реалізувати програми для детектування міміки, які можуть з успіхом використовуватися у сфері освіти, медицини, охорони та забезпечення

безпеки, комп'ютерних ігор, реклами та інших об'єктах. Користувачами сканерів людських емоцій також можуть стати люди з аутизмом, які насилу розпізнають міміку.

Метою цієї роботи є розробка і тестування методу розпізнавання емоційного стану людини, заснованого на застосуванні згорткових нейронних мереж.

### 1. Задача розпізнавання міміки людини

Головною метою математичної моделі є визначення домінуючих ознак об'єкта локалізації і розробка моделі для аналізу розпізнавання міміки людини. Для цього повинні бути вирішені наступні задачі:

1) Захоплення та відстеження особи.

Задача захоплення вимагає визначення: чи присутня особа на зображенні. Якщо присутня, то алгоритм повинен отримати розмір особи і координати її положення на зображенні. А відстеження вимагає подальшого визначення розміру і положення, що змінюються з плином часу.

2) Розпізнавання і опис особливостей особи.

Це завдання вимагає визначення положення органів (очі, ніс, рот і т.д.) на обличчі, а також визначення форми цих органів.

3) Класифікація.

Що стосується першої задачі, то слід виділити два її різновиди:

1. Локалізація обличчя (Face localization);

2. Відстеження переміщення обличчя (Face tracking).

Задача пошуку особи на зображенні може бути вирішена існуючими засобами. На сьогодні є кілька методів виявлення та локалізації обличчя на зображенні, які можна розділити на дві категорії:

1. Емпіричне розпізнавання;

2. Моделювання зображення обличчя.

До першої категорії відносяться методи розпізнавання «зверху-вниз» на основі інваріантних властивостей (invariant features) зображень обличчя, спираючись на припущення, що існують деякі ознаки присутності обличчя на зображенні, які

інваріантні щодо умов зйомки. Дані методи можна розділити на наступні підкатегорії:

- виявлення елементів і особливостей (features), які характерні для зображення особи (краю, яскравість, колір, характерна форма рис обличчя та ін.);
- аналіз виявлених особливостей, винесення рішення про кількість і розташування облич (емпіричний алгоритм, статистика взаємного розташування ознак, моделювання процесів візуальних образів, застосування жорстких і деформованих шаблонів тощо).

Для реалізації технології розпізнавання руху елементів обличчя необхідно взяти за основу спрощений варіант задачі виявлення особи. Це означає, що пошук обличчя можна буде проводити порівняно рідко (близько 10 кадрів / сек.), а оцінка руху органів обличчя повинна проводитися з більшою інтенсивністю.

Для коректної роботи алгоритму необхідно створення бази даних особливостей особи з подальшим тестуванням. Для більш точної реалізації емпіричних методів можуть бути використані моделі, які дозволяють врахувати можливості трансформації обличчя, а, отже, мають або розширений набір базових даних для розпізнавання, або механізм, що дозволяє моделювати трансформацію на базові елементи. Складнощі з побудовою бази даних класифікатора орієнтованих на самий різний спектр користувачів з індивідуальними особливостями, рисами обличчя і так далі, сприяє зниженню точності розпізнавання даного методу [1].

До другої категорії відносяться методи математичної статистики і машинного навчання. Методи цієї категорії спираються на інструментарій розпізнавання образів, розглядаючи задачу виявлення особи, як окремих випадок задачі розпізнавання. Зображенню ставиться у відповідність деякий вектор ознак, що використовується для класифікації зображень на два класи: обличчя / не обличчя. Найпоширеніший спосіб отримання вектора ознак – це використання самого зображення: кожен піксель стає компонентом вектора, перетворюючи зображення  $n \times m$  в вектор простору  $R^{(n \times m)}$ , де  $n$  і  $m$  – цілі позитивні числа [2]. Недоліком такого подання є надзвичайно висока розмірність простору ознак.

Для адаптації активного контуру до зображення міміки необхідно провести відповідну бінаризацію досліджуваного об'єкта, тобто його перетворення в різновид цифрових растрових зображень, а потім вже слід проводити відповідну оцінку параметрів активного контуру і обчислення вектора ознак.

Активна контурна модель визначається як:

1. Множина точок  $N$ .
2. Внутрішня область енергії шару (internal elastic energy term).
3. Зовнішня область енергії шару (external edge based energy term).

Для поліпшення якості розпізнавання виділяються два кольорових класи – шкіра і губи.

Функція належності кольоровому класу має значення в діапазоні від 0 до 1. Також для простоти припустимо, що область рота диктора вже виділена якимось чином. У цьому випадку основні операції по обробці отриманого зображення, які нам необхідно виконати, представлені на рис. 1.

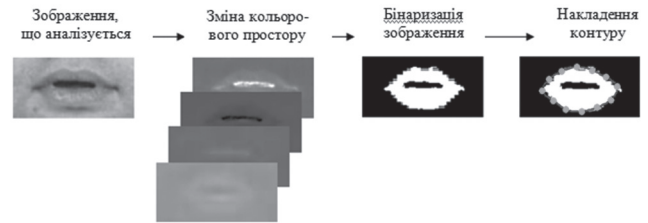


Рис. 1. Основні етапи обробки зображення

## 2. Нейромережові методи розпізнавання міміки

Нейромережові методи пропонують більш гнучкий підхід для вирішення задачі розпізнавання образів [3]. Навчаються нейронні мережі на наборі навчальних прикладів. Під час навчання мережі її вагові параметри налаштовуються за допомогою обраного алгоритму навчання. Навчена НМ може успішно застосовуватися для розпізнавання людини в різних умовах та при наявності різноманітних завад.

Типовий метод розпізнавання зображення складається з наступних компонентів:

1. Перетворення вихідного зображення в початкове уявлення (може включати в себе як предобробку, так і математичні перетворення, наприклад обчислення головних компонент);
2. Виділення ключових характеристик (наприклад, береться перші  $n$  головних компонент або коефіцієнтів дискретного косинусного перетворення);
3. Механізм класифікації (моделювання): кластерна модель, метрика, нейронна мережа тощо.

## 3. Архітектура згорткової нейронної мережі

Згорткова нейронна мережа (ЗНМ) відноситься до багатошарових мереж і складається з двох частин: виділяючих ознак і класифікатора (рис. 2). Виділення ознак здійснюється частиною мережі, яка складається за допомогою чергування шарів згортки (С-шари) і шарів усереднення (S-шари). Пластини з нейронами в кожному шарі сприймають інформацію з попереднього шару за допомогою свого рецептивного поля. Рецептивним полем є квадратне вікно з нейронами на попередньому шарі, яке пов'язане за допомогою параметрів, що настроюються, з нейроном в поточному шарі. Класифікатором зазвичай буває двошаровий перцептрон [4].

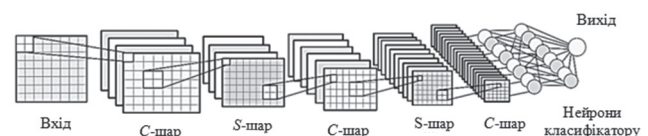


Рис. 2. Архітектура згорткової нейронної мережі

Особливість  $S$ -шару полягає в тому, що для всіх нейронів використовуються одні й ті ж параметри, що налаштовуються (ваги). Завдяки цьому, такі ваги, які називаються пов'язаними, дозволяють реагувати на деяку ознаку в будь-якому місці карти. Кожна карта  $S$ -шару може бути пов'язана з декількома картами попереднього шару, що дозволяє реагувати на інформацію з різних модальностей. У рецептивних полів є крок перетину, чим менше цей крок, тим більше рецептивних полів буде накладено на карту і тим більше нейронів буде в наступному шарі. Таким чином, виділення ознак відбувається за рахунок настроювання загальних ваг і розміру рецептивного поля.

Реакція нейрона визначається функцією активації. Функція активації береться однаковою для всіх елементів мережі і являє собою функцію, яка безперервно диференціюється в кожній точці і симетричну щодо осі абсцис. На вхід цієї функції подається згортка вхідних даних і настроюються ваги нейрона  $p$ . Найбільш поширеною функцією активації, яка б показала найменшу помилку узагальнення і високу швидкість збіжності помилки навчання, є гіперболічний тангенс.

Основним завданням  $S$ -шару є полегшення виділення загальних ознак за рахунок зменшення масштабу відфільтрованого відображення, отриманого на мапі попереднього  $S$ -шару. Рецептивні поля нейронів  $S$ -шару не перетинаються, і кожна карта  $S$ -шару пов'язана тільки з однією картою попереднього  $S$ -шару.

В кінцевому підсумку, карти шарів вироджуються в поодинокі нейрони, при цьому втрата точності відображень компенсується зростанням кількості карт і пов'язаністю між ними. Поодинокі нейрони вважаються входом для класифікатора, який складається з шару звичайних нейронів, в якому кожен нейрон пов'язаний з усіма нейронами входу. Кількість нейронів у класифікаторі відповідає кількості класів, до яких слід віднести вхідне зображення. Параметри для кожного нейрона в класифікаторі унікальні.

Навчання згорткової нейронної мережі відбувається методом зворотного поширення помилки, відповідно якому здійснюється коригування ваг за рахунок отриманого вектора помилки - різницею між отриманими і відомими даними. Тобто, якщо нейронна мережа неправильно класифікує подане на вхід зображення, синаптичні ваги оновлюються відповідно до помилки, і при наступному проході того ж зображення, мережа вірно класифікує об'єкт [5].

#### 4. Використання ЗНМ для класифікації емоцій

Згорткові мережі являють собою варіацію архітектури багатозарового перцептронів і включають в себе згорткові шари, шари підвибірки (субдискретизація), і повнозв'язні шари. Архітектура згорткової мережі використовує переваги двовимірної

структури вхідних даних — зображень за допомогою методу локальної зв'язності, обмежуючи кількість зв'язків між нейронами прихованого згорткового шару і вхідними даними. Конкретно, кожен нейрон прихованого шару пов'язаний тільки з обмеженою локальною (які не мають розривів) ділянкою зображення.

Крім цього, нейронна мережа використовує загальні, або розділяючи ваги, накладаючи штучне обмеження на алгоритм навчання зворотним поширенням помилки, так, щоб кожен нейрон прихованого шару мав набір ваг, спільний з іншими нейронами цього шару. При прямому поширенні така мережа здійснює математичну операцію згортки вхідного зображення набором фільтрів, які подаються вагами нейронів прихованого шару.

Проміжними результатами мережі є так звані «карти ознак» - двовимірні матриці, що представляють собою результат згортки окремим фільтром.

Шар підвибірки або субдискретизація, виконує операцію угруповання карт ознак, розглядаючи регіони розміру  $p * p$  та агрегуючи значення, отримані в результаті згортки. Основне призначення субдискретизації - знизити варіативність даних, забезпечуючи стійкість до трансляцій локальної ознаки в межах окремого регіону. Таким чином, в умовах, коли одна і та сама ознака виявляється зміщеною на деяке значення ( $\delta x, \delta y$ ) в межах, що не перевищують  $P$ , відповідний нейрон, що інкапсулює локальну субдискретизовану ознаку зображення, буде як і раніше активний. Таким чином мережа забезпечує інваріантність до просторових перетворень.

Однією з основних особливостей згорткової мережі є те, що така модель не володіє інформацією про локалізацію зображеного об'єкта - його конкретного місцезнаходження та орієнтацію в просторі. При цьому в рішенні прикладних задач управління і обробки інформації, знання параметрів локалізації є необхідною умовою - в залежності від розташування або пози об'єкта система обробки інформації може класифікувати зображення по-різному відповідно до покладених на неї задач. Крім того, без знання параметрів локалізації, згорткова мережа вразлива до узагальненого класу проблем цілісності, тобто модель, навчена деяким локальним ознакам зображеного об'єкта, буде позитивно класифікувати штучні зображення, де відповідні елементи розташовані в хаотичному порядку як помилку, яку з легкістю уникає людина.

Операція згортки забезпечує інваріантність по відношенню до трансляції локальних ознак (зрушенню по осях  $x$  та  $y$ ). Архітектура згорткових мереж не передбачає стійкості до інших афінних перетворень, таких як обертання, дзеркальне відображення і масштабування. Для вирішення цієї проблеми, як правило, використовуються евристичні методи (вирівнювання зображення по лінії горизонту, використання просторових пірамід і різних відображених копій оригіналу). Перетворення,



які не є афінними по відношенню до плоского зображення, такі як обертання об'єкта в тривимірній площині, аналогічним чином не можуть бути оброблені за допомогою операції згортки. Для об'єктів, представлених в різних орієнтаціях, моделі доводиться навчатися різним, непересічним наборам ознак.

Згорткові нейронні мережі та інші підходи, які використовують локальні інваріантні ознаки, в процесі розпізнавання періодично вимушені навчатися ознакам, які максимізують інваріантність в рамках представленої вибірки, але не забезпечують дискримінантність представлення об'єкту в цілому.

Альтернативні підходи до виділення локальних ознак включають в себе методи класичного комп'ютерного зору, які не використовують навчальні моделі. Ці методи здійснюють пошук на зображенні характерних ділянок, які відповідають алгоритмічно явно заданим умовам. Серед них виділяються:

1. Виявлення країв / меж. Краєм називається ділянка зображення, яка представляє собою межу між двома контрастними регіонами, помітну людським оком. Математично точки, складові такої ділянки, визначаються як точки, де градієнт зображення має локальний максимум. Крім цього, виділення меж дозволяє знизити вплив деяких факторів, таких як освітлення і тіні, які не впливають на розпізнавання. Виділення меж (за допомогою фільтрів Кенні, Собеля, або згортки вейвлетами Габора) часто використовується як попередній етап обробки зображень в інших алгоритмах розпізнавання, в тому числі - згорткових мережах.

2. Виявлення кутів або «точок інтересу». До цієї групи належать алгоритми, які виділяють локальні ділянки зображення, максимально чутливі до змін. Відповідна умова формулюється наступним чином: якщо розглянути функцію ковзного вікна  $w(x, y)$ , то для будь-яких комбінацій значень зсуву  $(u, v)$  в двовимірній площині зображення знайдемо такі  $x$  і  $y$ , які максимізують

$$E(x, y) = \sum_{u, v} \omega(x, y) [I(x+u, y+v) - I(x, y)]^2, \quad (1)$$

де  $I$  — інтенсивність зображення в межах, заданих функцією вікна. Традиційно ця група алгоритмів (що включає в себе детектор Харріса, детектор Ши-Томасі та інші) використовувалася для відшукування кутів між прямими лініями, але в даний момент розглядаються також будь-які точки з високим значенням кривизни.

3. Виявлення ділянок неоднорідності. Під ділянками неоднорідності, на відміну від кутів, розуміються деякі безперервні регіони зображення, які відрізняються за значеннями кольору або інтенсивності від навколишнього фону, і при цьому схожі між собою. Як правило, такі ділянки відповідають локальним екстремумам зображення.

Перераховані локальні ознаки широко використовуються в задачах візуального трекінгу і стеження за об'єктом, але в чистому вигляді непридатні для задачі розпізнавання в силу своєї недискримінантної природи - такі методи не надають можливості відрізнити один кут (або ділянку неоднорідності) від іншого і визначити відмінність або схожість в числовому еквіваленті. Цим вимогам, проте, задовольняють підходи, які використовують ідею відшукування точок інтересу з використанням локальних дескрипторів, і представлені такими алгоритмами як SIFT, SURF і ORB [6].

Дескриптор є композицією ділянок зображення, локалізованих спільно, де для кожної ділянки або блоку розраховуються параметри орієнтації, масштабу, і деякі інші, що дозволяють з деякою вірогідністю ідентифікувати місце розташування ознаки, яке відповідає даному дескриптору. З урахуванням використання в дескрипторах параметрів орієнтації та масштабу, такі ознаки виявляються інваріантними по відношенню до обертання зображення, зміни масштабу і яскравості / контрасту. Такі алгоритми як SIFT і ORB, крім того, забезпечують можливість зіставлення зображень, співвідносячи однакові локальні ознаки один з одним.

Ознаки, що використовують локальні дескриптори, можуть ефективно використовуватися для розпізнавання зображень одного і того ж об'єкта під впливом афінних перетворень в тривимірному просторі. Локальність ознак дає можливість справлятися з проблемою оклюзії, забезпечуючи можливість зіставляти об'єкти по частинах. Основні проблеми методів сімейства SIFT - слабка стійкість до варіативності, що не дозволяє алгоритму відносити до одного класу об'єкти, які візуально відрізняються формою або текстурою.

Методи виділення локальних ознак дозволяють справлятися з деякими класами проблем розпізнавання зображень, забезпечуючи стійкість до оклюзії, знижуючи обчислювальне навантаження при обробці зображень високої розмірності і дозволяючи формувати інваріантні ознаки для виявлення об'єктів під дією інваріантних перетворень. При цьому нездатність здійснювати локалізацію об'єктів на зображенні і вразливість до хаотичного розташування локальних ознак призвела до появи методів, що враховують просторові відносини між локальними ознаками при розпізнаванні [7].

#### 4. Моделювання

З використанням сучасних технологій штучного інтелекту та комп'ютерного зору було розроблено програмний комплекс для розпізнавання емоційного стану людини. Було розглянуто декілька варіантів розпізнавання міміки, перший з яких виявився невдалим, що було виявлено вже після створення та навчання мережі.

Початковий алгоритм включав в себе вирішення задачі класифікації за допомогою багаточарового



персептрону із ста тридцяти шістьма вхідними нейронами, які приймали шістдесят вісім точок антропометричної моделі обличчя. Експеримент виявився невдалим через те що нейронна мережа не змогла знайти закономірностей.

На цьому етапі алгоритм було змінено на використання глибинної згорткової нейронної мережі, яка вважається однією з найкращих мереж для розпізнавання та класифікації графічних зображень. Слабким місцем ЗНМ є висока чутливість до різних перетворень зображень, наприклад, афінних, через що було вирішено стандартизувати вхідні зображення афінними перетвореннями.

Таким чином реалізацією алгоритму є програма на мові програмування Python з використанням сучасних бібліотек комп'ютерного зору dlib, OpenCV, та бібліотеки машинного навчання TensorFlow від Google. Нейронна мережа була навчена з використанням маркірованого набору даних розміру 20000 зображень. Мережа здібна розпізнавати 7 базових мімічних проявів, серед яких злість, радість, сум, здивованість, нейтральність, страх та відраза.

Після 100 епох навчання точність розпізнавання складала близько 80%, а для зберігання усіх параметрів мережі знадобилося 445 МБ пам'яті на жорсткому диску. Слід зазначити, що розпізнавання страху має більш високу імовірність помилки, на відміну від розпізнавання посмішки, яку можна розпізнати майже з 99% точністю. Приклади розпізнавання емоцій людини за допомогою ЗНМ наведено на рис. 3. На рисунках наведено фотографію людини, вірогідність кожної емоції у вигляді стовбової діаграми та смайлик, що відображає найбільш вірогідну емоцію. Графік зміни вірогідності правильного розпізнавання емоції протягом процесу навчання наведено на рис.4.



Рис. 3. Приклади розпізнавання емоцій людини за допомогою ЗНМ

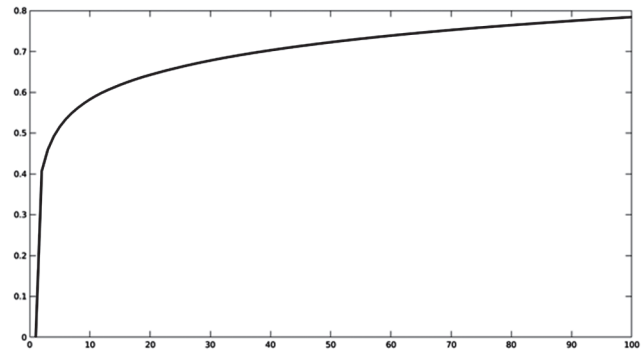


Рис. 4. Графік зміни вірогідності правильного розпізнавання емоції

## Висновки

Як свідчать результати моделювання, використання ЗНМ є досить ефективним при вирішенні задач розпізнавання образів, зокрема задачі виявлення емоційного стану людини. Слід, однак, зазначити, що час навчання мережі при цьому є досить великим (кілька діб). Також істотною є кількість параметрів мережі, що значно ускладнює застосування цієї технології на мобільних пристроях.

Чутливість ЗНМ до різних перетворень зображень потребує деякої її модифікації, наприклад, використання афінних перетворень або інших методів нормалізації зображень.

Потребує також подальшого вивчення питання робастності алгоритмів розпізнавання в умовах різного роду завад.

## Список літератури:

1. Droniou A. Gated autoencoders with tied input weights / A. Droniou, O. Sigaud // International Conference on Machine Learning. – 2013. – Pp. 17–24.
2. Гиренко А.В. Методи кореляційного виявлення об'єктів / А.В. Гиренко, В.В. Ляшенко, В.П. Машталір, Є.П. Путятін // Харків: АТ «БізнесІнформ», 1996. 112 с.
3. Krizhevsky A. ImageNet classification with deep convolutional neural networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. Hinton // Advances in Neural Information Processing Systems (Proc. of NIPS). – 2012. – P. 1106-1114.
4. 7. Deng L. Deep Learning: Methods and Applications / L. Deng, D. Yu // Fundamentals and Trends in Signal Processing. – 2013. – v. 7. – №3. – P. 197-387.
5. Sun Y. Deep convolutional network cascade for facial point detection / Y. Sun, X. Wang, X. Tang // Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2013. – P. 3476-3483.
6. Rublee E. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF / E. Rublee // Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference. – 2011. – Pp. 2564–2571.
7. Ding Ch. Multi-task Pose-Invariant Face Recognition / Ch. Ding, Ch. Xu, D. Tao // IEEE Trans. on Image Processing. – 2015. – v. 24. – v.3. – P.980-986.

Надійшла до редколегії 19.04.2017

УДК 004.9:530.1

І.Б. Швороб<sup>1</sup><sup>1</sup>Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

## ПІДХІД ДО РОБОТИ ЗІ СЛАБОСТРУКТУРОВАНИМИ МЕДИЧНИМИ ДАНИМИ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ВАГ РЕБЕР ДЛЯ ДОКУМЕНТО-ОРІЄНТОВАНОЇ ГРАФОВОЇ БАЗИ ДАНИХ

В роботі запропоновано підхід до роботи з слабоструктурованими даними збереженими у вигляді документо-орієнтованої графової бази даних. Розглянуто способи зображення зваженого графа та наведено спосіб зображення документо-орієнтованого зваженого графа. Наведено алгоритм перерахунку ваг ребер результуючого графа на основі врахування оцінок якості попереднього вибору даних з результуючого графа. Проведено експериментальне дослідження роботи запропонованого алгоритму для роботи зі слабоструктурованими медичними даними.

СЛАБОСТРУКТУРОВАНІ ДАНІ, NOSQL, NEO4J, ГРАФОВІ БАЗИ ДАНИХ, ДОКУМЕНТО-ОРІЄНТОВАНІ ГРАФОВІ БАЗИ ДАНИХ, ЗВАЖЕНИЙ ГРАФ, ВАГА РЕБРА ГРАФА, АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ВАГИ РЕБРА ГРАФА

### Вступ

Існуючі підходи до опрацювання неструктурованих та напівструктурованих даних на сьогоднішній день мають емпіричний підхід. Відсутність систематизації та теоретичного обґрунтування використовуваних методів та засобів опрацювання таких даних негативно впливає на застосування нових методик та методів. Однією з проблем в роботі зі слабоструктурованими даними є їх оптимальне зберігання. У роботі [1] запропоновано підхід до збереження слабоструктурованих медичних даних.

Істотною перевагою зберігання даних в документо-орієнтованій базі даних є зручність для подальшої обробки даних. Однак запити будуть складними і при запиті може прийти набагато більше інформації, ніж це необхідно. Це, в свою чергу це впливає на продуктивність. Дані в графовій базі даних займають великий об'єм. Час оптимізації бази даних графа є більшим. Графові бази даних значно домінують над реляційними при пошуці в реальному часі з великими обсягами даних. Таким чином, графові бази даних слід використовувати при наявності великих обсягів даних і ресурсів, за умови, що швидке виконання пошуку є дуже важливим.

У даній роботі основною метою є розроблення алгоритму роботи зі слабоструктурованими даними, збереженими за допомогою документо-орієнтованої графової бази даних запропонованої у роботі [1]. Проведено аналіз розробленого алгоритму на прикладі роботи зі слабоструктурованими медичними даними.

### 1. Аналіз останніх публікацій

В роботі [1] було розглянуто NoSQL бази даних та запропоновано об'єднання документо-орієнтованої та графової баз даних. Під час роботи зі слабоструктурованими даними важливо зберегти якомога більшу їх кількість в найзручнішій для використання формі. База даних на основі документо-орієнтованого графа включає складність вузла

графа даних, тобто, коли вузлом є елемент з багатьма різними характеристиками. Така реалізація використовує документ для забезпечення гнучкості запитів до графових баз даних, а збереження у вигляді ключ/значення забезпечує швидкий пошук даних.

Об'єкт  $G$  такої бази даних може бути представлений наступним чином:

$$G = \left\{ \left\{ [k, v] \right\}, \left\{ \langle e_1, \dots, e_n \rangle \right\} \right\}.$$

В роботі [1] розглянуто приклад збереження та обробки даних про лікарські засоби, а також побудовано документ-орієнтований граф на основі бази даних Neo4j. Створені вершини графа діляться на два типи: препарати і хвороби (показання та протипоказання). Ребра також двох типів: показання та протипоказання.

Таким чином, база даних на основі документо-орієнтованого графа в даному випадку є дуже зручним засобом для збереження даних. Слід зазначити, що при виборі препаратів потрібно враховувати не тільки показання та протипоказання, а також інші фактори, такі як дозування, віку і ваги пацієнта та інше.

Було здійснено аналіз обробки слабоструктурованих даних для різних типів баз даних. Аналіз проводився за такими параметрами: кількість створюваних об'єктів (документів або вузлів) ( $N$ ), об'єм бази даних ( $W$ ), час запису в базу даних ( $t$ ), час виконання запиту з декількома умовами ( $t_c$ ). Для аналізу було використано 100 інструкцій для медичних препаратів. За результатами аналізу для документо-орієнтованої БД було створено 100 записів, для графової БД та документо-орієнтованого графа – по 740 записів. Об'єм баз даних становить 40,2Мб, 30.9Мб та 61.1Мб відповідно, час запису в БД – 10мс, 15мс, 20.75мс, а час виконання запиту з кількома умовами становить 2с, 1.4с, 1.3с відповідно.

В залежності від вимог до проекту та для оптимізації і пришвидшення роботи із великими об'ємами даних потрібно використовувати

відповідні бази даних. Наприклад, для програмного рішення дуже важливим є швидкий пошук, тому для цього можна використати графову базу даних. В окремих випадках можна комбінувати представлення даних у вигляді документно-орієнтованих графових баз даних.

## 2. Постановка задачі

Зважаючи на великий обсяг збережених слабо-структурованих даних та їхню різноманітність, доволі важко здійснювати швидкий пошук, а також результати такого пошуку можуть містити надлишкові дані. Саме тому виникає потреба в розробленні методів для покращення роботи з такими даними та отримання більш якісного результату.

Для запропонованого в роботі [1] підходу до збереження слабоструктурованих даних у вигляді документно-орієнтованого графу з метою вирішення даної проблеми варто використати переваги графової структури бази даних. Саме для цього необхідно розробити алгоритм для роботи із слабоструктурованими даними, що базується на використанні ваг ребер графа, що у свою чергу дозволить скоротити об'єм результуючих даних за рахунок ігнорування даних, ваги ребер між вершинами яких будуть меншими за встановлене значення.

## 3. Застосування ваг ребер для документно-орієнтованої графової бази даних

Подальше узагальнення відображення зв'язків між об'єктами слабоструктурованих даних за допомогою графових баз даних складається в приписуванні ребрам та дугам деяких кількісних значень, якісних ознак чи характерних властивостей, які називають вагою.

**Означення:** *Зваженим* називають простий граф, кожному ребру  $e$  якого приписано дійсне число  $w(e)$ . Це число називають *вагою* ребра  $e$  [2].

Вагою ребра може бути: порядкова нумерація ребер та дуг, яка показує на чергу при їх розгляданні (пріоритет чи ієрархія); довжина шляху, пропускна здатність; кількість набраних очок; характер відношень між об'єктами та ін. Зважені орієнтовані графи застосовують у мережевому плануванні, у теорії ланцюгів.

Існує багато способів зображення зваженого графа. Розглянемо деякі з них.

Нехай дано граф

$$G = (V, E)$$

де  $|V|=n$ ,  $|E|=m$

**Спосіб 1.** Задання матриці ваг  $W$ , яка є аналогом матриці суміжності. Для такої матриці елемент  $w_{ij}$ , у випадку якщо ребро  $(v_i, v_j) \in E$ , буде позначатись як

$$w_{ij} = w(v_i, v_j)$$

Якщо ж ребро  $(v_i, v_j) \notin E$ , то, в залежності від задачі, яку потрібно розв'язати, елемент матриці буде позначатись як

$$w_{ij} = 0 \text{ або } w_{ij} = \infty.$$

**Спосіб 2.** Інколи граф задають списком ребер. Для зваженого графа під кожний елемент списку  $E$  можна відвести три комірки — дві для ребра і одну для його ваги, тобто всього потрібно  $3m$  комірок.

**Спосіб 3.** Граф можна подати у вигляді списку суміжностей. Для зваженого графа кожен список  $Adj[u]$  містить крім вказівників на всі вершини  $v$  множини  $G(u)$  ще й числа  $w(u, v)$ .

Розглянемо об'єкт графа, поданого в роботі [1]:

$$G = \{ \langle N, E \rangle \},$$

де  $N$  — вершина графа,  $E$  — множина ребер.

Об'єкт такого графа з урахуванням ваг буде мати наступний вигляд:

$$G = \{ \langle N, E, W \rangle \},$$

де  $W$  — множина ваг ребер.

Множину ваг ребер подамо у наступному вигляді:

$$W = \{ \langle w_1, \dots, w_n \rangle \}.$$

Отже, документно-орієнтований зважений граф буде подано як

$$G = \{ \{ \langle k, v \rangle, \{ \langle e_1, \dots, e_n \rangle \}, \{ \langle w_1, \dots, w_n \rangle \} \} \}.$$

## 4. Алгоритм перерахунку ваги ребер

Нехай ваги ребер документно-орієнтованого графа знаходяться в межах від 0 до 1. Початковим значенням для всіх ребер визначимо 1.

Наведемо алгоритм перерахунку ваг ребер для документно-орієнтованого графа з урахуванням початкових вхідних даних та введених оцінок якості попереднього вибору даних з результуючого графа.

1. Введення початкових даних для запиту до документно-орієнтованої графової бази даних для отримання результуючого графа.

2. Пошук в результуючому графі вершин з найкоротшим шляхом та видалення їх з результуючого графа, якщо значення шляху менше за встановлене експертом.

Для пошуку вершин з найкоротшим шляхом використовуємо алгоритм Дейкстри [3].

3. Здійснення вибору даних з результуючого графа (вибір вершин графа, що є об'єктом бази даних).

4. Введення оцінки якості вибору даних з результуючого графу (наприклад, оцінка відповідності навиків обраного працівника до вказаних в резюме, оцінка якості лікування певних симптомів обраними медичними препаратами і т.д.). Оцінка виставляється в межах від 0 до 1 (1 — максимальна оцінка якості, 0 — мінімальна), що в свою чергу стане новою вагою ребра між вершинами вхідних даних.

5. Здійснення перерахунку ваг ребер між вхідними даними та обраними раніше вершинами результуючого графа.

5.1. Перерахунок ваг ребер між вхідними даними. Нехай в нас є множина з  $n$  вершин вхідних



даних, початкові ваги ребер  $w_i$  (де  $i$  – номер вершини (від 1 до  $n$ )) між якими становила 1. Нехай для кожного ребра між вершинами введено оцінку якості  $i$  її значення становить  $r_i$ , де  $i$  – номер вершини (від 1 до  $n$ ). Оновлена вага ребра між вершинами  $k_i$  буде розраховуватись за формулою:

$$k_i = w_i - r_i.$$

Якщо значення нової ваги ребра між вершинами становить 0, то таку вершину можна видалити з результуючого графа.

5.2. Перерахунок ваги ребра між вершиною вхідних даних та вершиною обраного результату. Для цього необхідно використати всі попередньо введені оцінки якості вибору. Нехай маємо масив  $R$  попередніх оцінок якості вибору. Об'єкт такого масиву буде мати наступний вигляд:

$$R = \{\langle x, f \rangle\},$$

де  $x$  – індивідуальне значення оцінки;  $f$  – повторюваність оцінки.

Використовуючи формулу середнього арифметичного зваженого знаходимо нову вагу між вершиною вхідних даних та вибраним результатом:

$$w = \frac{\sum_{i=1}^n x_i f_i + r}{\sum_{i=1}^n f_i + 1},$$

де  $r$  – нова введена оцінка.

Далі оновлюємо масив  $R$ , додавши до нього нове значення оцінки.

### 5. Приклад застосування роботи зі слабоструктурованими медичними даними на основі використання ваг ребер в документо-орієнтованій графовій базі даних

Розглянемо роботу розробленого алгоритму на прикладі роботи з даними про лікарські засоби. Для дослідження обрано 100 пацієнтів з однаковими симптомами: температурою та запаленням. Для роботи з даними обрано базу даних Neo4j [4]. Запит до такої бази даних з урахуванням вхідних даних – симптомів пацієнта, буде мати наступний вигляд:

```
MATCH (p:Disease) - [:INDICATION] ->
(m:Antibiotic)
WHERE p.name = «Infection» AND p.name =
«Temperature»
RETURN m.title
```

В результаті отримуємо граф, зображений на рис. 1.

Створені вершини графа будуть трьох типів: пацієнт, хвороби та препарати. Ребра будуть двох типів: симптоми та показання. На початку дослідження всі ваги ребер встановлюються в 1.

Встановлюємо експертне значення для порівняння з найкоротшим шляхом між вершинами рівним 0,1. Тобто всі шляхи між вершинами симптомів та вершинами препаратів, які менші за 0,1 будуть видалитись.

Враховуючи, що для даного прикладу ваги всіх ребер однакові, пропускаємо крок з пошуком

найкоротшого шляху від симптомів до препаратів.

Нехай для заданих симптомів буде обрано препарат Ампіцилін. Тоді після здійснення вибору отримуємо новий результуючий граф, зображений на рис. 2.

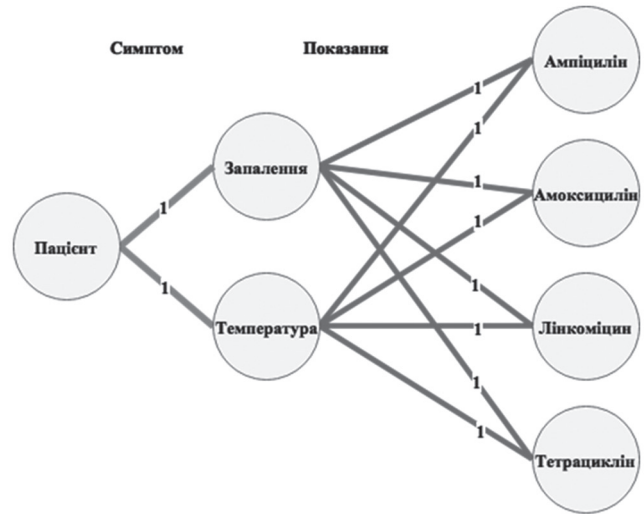


Рис. 1. Результат виконання запити до документо-орієнтованої графової бази даних

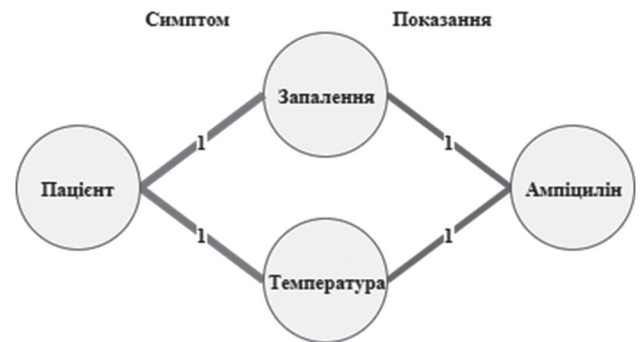


Рис. 2. Граф-відображення призначеного лікування пацієнтові

Після проведення лікування, здійснюється повторний огляд пацієнта та лікарем вводиться оцінка якості лікування даним препаратом, тобто визначається чи допоміг обраний препарат вилікувати симптоми пацієнта. Оцінка виставляється в межах від 0 до 1. Якщо симптом зник повністю, то виставляється оцінка 1, якщо зовсім не зник – то 0. Якщо симптом вилікувано частково, то оцінка виставляється на розсуд лікаря. Якщо симптом вилікувано повністю, то вага ребра між вершинами пацієнта та симптома стає рівною 0, а, отже, вершина даного симптома видалається з результуючого графа.

В даному прикладі припустимо, що в пацієнта повністю зник симптом Температура і встановлено оцінку 1, але ознаки симптому Запалення ще проявляються і визначено оцінку якості лікування як 0,82. В зв'язку з цим, за формулою, наведеною у пункті 5.1, обраховуємо нову вагу ребра між вершинами пацієнта та симптому:

1) вага між вершиною пацієнта та вершиною симптому Температура:



$$k_1 = w_1 - r_1 = 1 - 1 = 0;$$

2) вага між вершиною пацієнта та вершиною симптому Запалення:

$$k_2 = w_2 - r_2 = 1 - 0,82 = 0,18.$$

Враховуючи, що в даному прикладі це перша експертна оцінка якості, то за формулою, наведеною у пункті 5.2. масив  $R$  кожного ребра буде мати 0 елементів. Обраховуємо нову вагу ребра між вершиною обраного препарату та вершиною симптому:

1) вага між вершиною симптому Температура та вершиною та вершиною препарату Ампіцилін:

$$w = \frac{0+r}{0+1} = \frac{r}{1} = \frac{1}{1} = 1.$$

В масив  $R$  обраного ребра додаємо новий об'єкт  $\langle 1;1 \rangle$ .

2) вага між вершиною симптому Запалення та вершиною препарату Ампіцилін:

$$w = \frac{0+r}{0+1} = \frac{r}{1} = \frac{0,82}{1} = 0,82.$$

В масив  $R$  обраного ребра додаємо новий об'єкт  $\langle 0,82;1 \rangle$ .

На рис. 3 зображено новий результуючий граф з перерахованими вагами та видаленою вершиною лікуваного симптома.



Рис. 3. Результуючий граф з урахуванням введеної оцінки якості результату вибору

Для наступного пацієнта з такими ж симптомами, результуючий граф зображено на рис. 4.

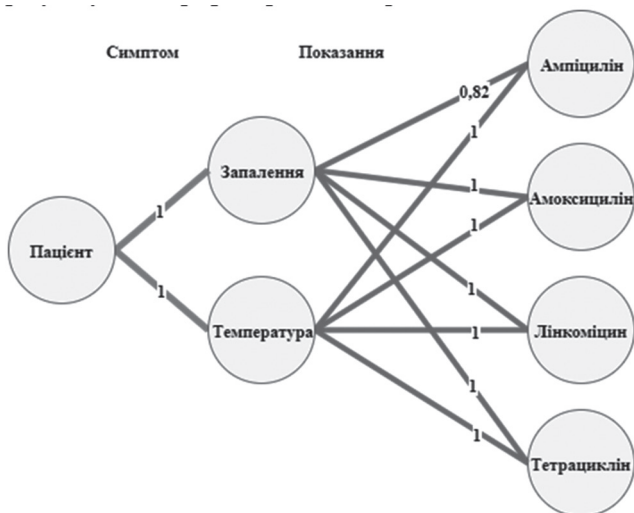


Рис. 4. Результат виконання запиту до документо-орієнтованої графової бази даних з урахуванням оцінки якості результату вибору при визначенні ваг ребер

Пошук по даному графові вершин з найкоротшим шляхом покаже, що найкоротша відстань між вершинами симптому Запалення та вершиною

препарату Ампіцилін і становить 0,82. Проте, оскільки отримане значення більше за встановлене експертне значення, то вершину препарату Ампіцилін не видаляємо.

Припустимо, що лікарем для лікування нового пацієнта знову було обрано препарат Ампіцилін. Новий результуючий буде мати вигляд, наведений на рис. 5.

Нехай в даному випадку препарат повністю вилікував симптоми пацієнта, відповідно ваги між вершиною пацієнта та вершинами симптомів (пункт 5.1.) будуть становити 0, а вершини симптомів будуть видалені з результуючого графа.

За формулою, наведеною у пункті 5.2, перераховуємо ваги ребер між вершинами симптомів та вершиною препарату.

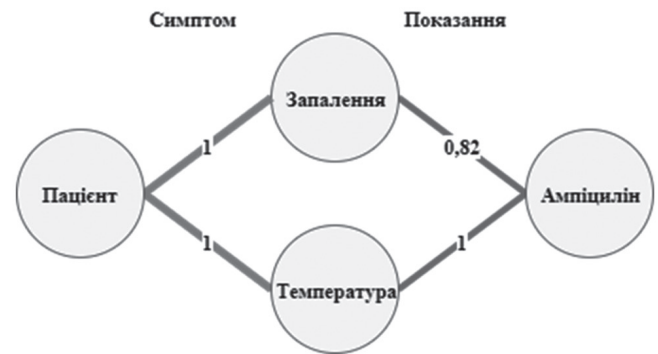


Рис. 5. Граф-відображення призначеного лікування новому пацієнтові

1) вага між вершиною симптому Температура та вершиною та вершиною препарату Ампіцилін:

$$w = \frac{\sum_{i=1}^1 x_i f_i + r}{\sum_{i=1}^1 f_i + 1} = \frac{1*1+1}{1+1} = \frac{2}{2} = 1.$$

В масиві  $R$  обраного ребра оновлюємо значення кількості оцінок в існуючому об'єкті  $\langle 1;2 \rangle$ .

2) вага між вершиною симптому Запалення та вершиною препарату Ампіцилін:

$$w = \frac{\sum_{i=1}^1 x_i f_i + r}{\sum_{i=1}^1 f_i + 1} = \frac{0,82*1+1}{1+1} = \frac{1,82}{2} = 0,91.$$

В масив  $R$  обраного ребра додаємо новий об'єкт  $\langle 1;1 \rangle$ .

В результаті, для наступного пацієнта з такими ж симптомами, результуючий граф буде мати вигляд як на рис. 6.

Після опрацювання даних 50-ти пацієнтів отримуємо граф, зображений на рис.7.

Знаходимо найкоротший шлях між вершинами. За алгоритмом Дейкстри це буде значення ваги графа між вершиною симптома Температур та Вершиною препарату Лінкоміцин і становить 0,2, проте це значення більше за встановлене експертне значення, тому вершину препарату не видаляємо.

Для наступного пацієнта було обрано препарат Амоксицилін. Результуючий граф зображено на рис. 8.

Припустимо, що в результаті лікування обраний препарат частково вилікував симптоми пацієнта. Здійснюємо перерахунок ваг ребер-симптомів:

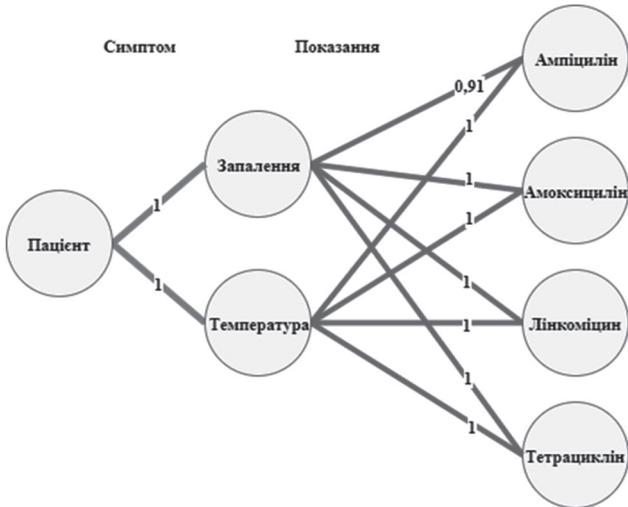


Рис. 6. Результат виконання запиту до документо-орієнтованої графової бази даних з урахуванням оцінки якості результату вибору при визначенні ваг ребер

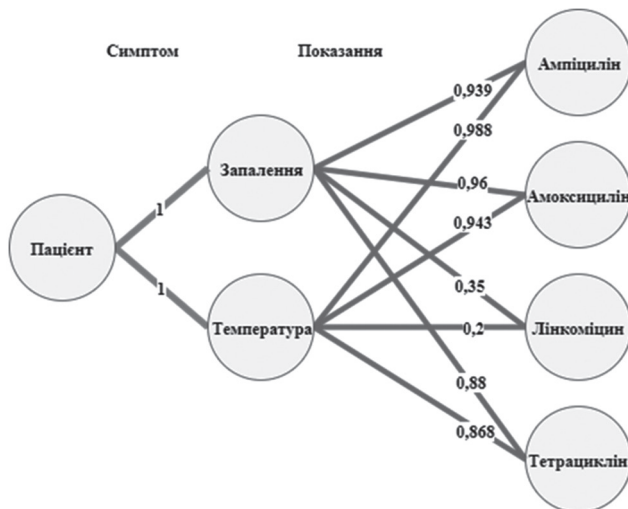


Рис. 7. Документо-орієнтований граф після опрацювання вибірки з 50 пацієнтів

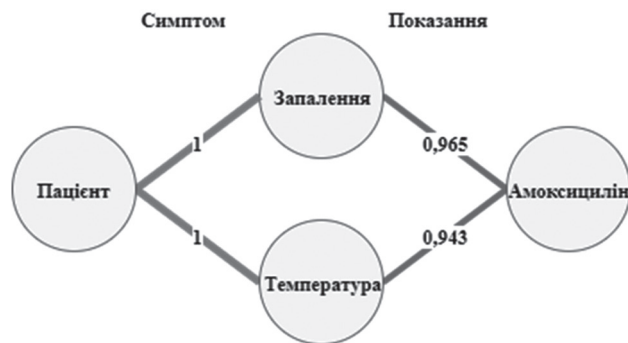


Рис. 8. Граф-відображення призначення лікування 51 пацієнтові

1) вага між вершиною пацієнта та вершиною симптому Температура зі вказаною оцінкою якості  $r_1 = 0,91$ :

$$k_1 = w_1 - r_1 = 1 - 0,91 = 0,09;$$

2) вага між вершиною пацієнта та вершиною симптому Запалення зі вказаною оцінкою якості  $r_2 = 0,95$ :

$$k_2 = w_2 - r_2 = 1 - 0,95 = 0,05.$$

Обраховуємо нову вагу ребра між вершиною обраного препарату та вершиною симптому:

1) вага між вершиною симптому Температура та вершиною та вершиною препарату Амоксицилін:

$$w = \frac{1 \cdot 5 + 0,95 \cdot 5 + 0,91 \cdot 3 + 0,73 \cdot 1 + 0,91}{5 + 5 + 3 + 1 + 1} = 0,941.$$

В масиві  $R$  обраного ребра оновлюємо значення існуючого об'єкта  $\langle 0,91; 4 \rangle$ .

2) вага між вершиною симптому Запалення та вершиною препарату Амоксицилін:

$$w = \frac{1 \cdot 7 + 0,95 \cdot 5 + 0,88 \cdot 2 + 0,95}{7 + 5 + 2 + 1} = 0,964.$$

В масиві  $R$  обраного ребра оновлюємо значення існуючого об'єкта  $\langle 0,95; 6 \rangle$ .

Результуючий граф для даного пацієнта після введення оцінок якості результату вибору зображено на рис. 9.

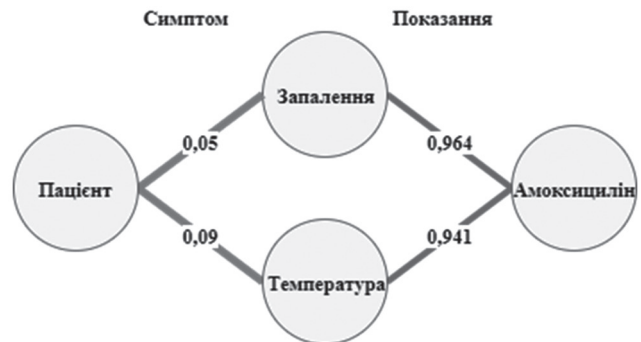


Рис. 9. Граф-відображення обраного лікування для пацієнта після введення оцінок якості результатів вибору лікування

Після опрацювання вибірки зі 100 пацієнтів з однаковими симптомами, отримуємо граф, зображений на рис. 10.

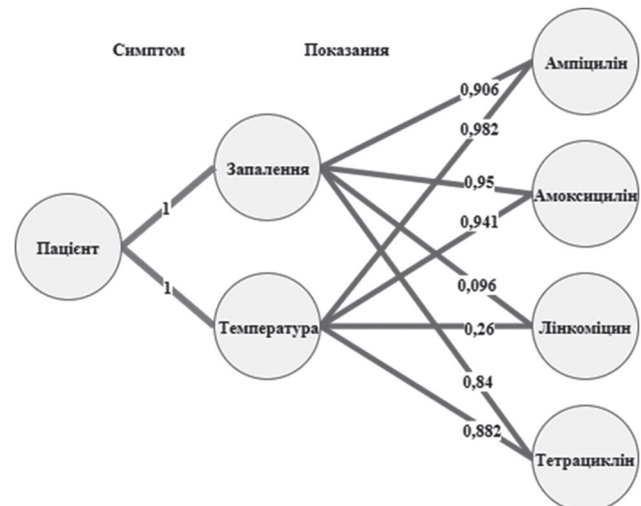


Рис. 10. Результат запиту до документо-орієнтованої графової бази даних

Після пошуку найкоротшого шляху між вершинами бачимо, що найкоротшим шляхом є відстань між вершинами симптому Запалення та вершиною препарату Лінкоміцин і становить 0,096, що менше за експертне значення. Отже, вибрану вершину необхідно видалити з графу і при наступному пошуку дана вершина препарату відобразиться не буде. Кінцевий граф після проходження запропонованого алгоритму зображено на рис. 11.

Отже, запропонований алгоритм є оптимальним рішенням для роботи з великими об'ємами слабоструктурованих даних, оскільки дозволяє відкидати дані з низькою ефективністю при певному вхідному наборі параметрів.

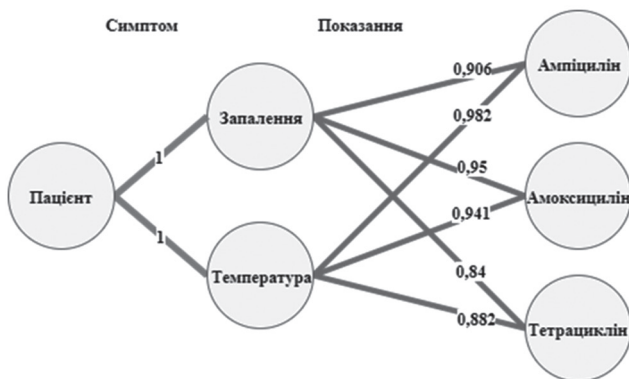


Рис. 11. Граф-відображення проведеного дослідження запропонованого алгоритму

### Висновки

В роботі запропоновано алгоритм роботи зі слабоструктурованими даними, збереженими за допомогою документо-орієнтованої графової бази даних [1], на основі застосування ваг ребер графа.

Використання ваг ребер графа, розрахованих на основі оцінок якості результатів вибору даних,

дозволяє визначати оптимальні для подальшої роботи дані та відкидати неефективні при певному вхідному наборі параметрів дані.

Було проведено дослідження на основі слабоструктурованих медичних даних, де за запропонованим алгоритмом здійснювався вибір лікарем препаратів для лікування симптомів пацієнта та, на основі введення оцінок якості лікування розраховувались ваги ребер результуючого графа та визначались найбільш ефективні препарати, а найменш ефективні не брались до уваги. Слід зазначити, що при виборі препаратів потрібно враховувати не тільки показання та протипоказання, а також інші фактори, такі як дозування, вік і вага пацієнта та інше. Подальші дослідження будуть спрямовані на розширення та оптимізацію бази даних для врахування цих факторів, що дозволить точніше вибирати препарат, а також прогнозувати більш ефективний препарат при заданих умовах.

Запропонований підхід можна використати як засіб для допомоги прийняття рішень лікаря або в іншій сфері пов'язаній із роботою зі слабоструктурованими даними.

### Список літератури:

1. Швороб, І.Б. Новий підхід до збереження слабоструктурованих медичних даних / І.Б. Швороб. — Науковий вісник НЛТУ України — 2016 р. — Вип. 26.4 — 382-390 с.
2. Никольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. Дискретна математика: Підручник. — Львів: «Магнолія2006», 2008. — 608 с.
3. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs // Numer. Math — Springer Science+Business Media, 1959. — Vol. 1, Iss. 1. — P. 269–271.
4. Robinson I. Graph Databases/ Robinson I., Webber J., Eifrem E. — O'Reilly Media, Inc., 2015. — pp.25-53.

Надійшла до редколегії 30.05.2017.

УДК 004.89

А.С. Нечипоренко<sup>1</sup>, Г.А. Зацеркляний<sup>2</sup><sup>1</sup>ХНУРЕ, м. Харків, Україна, alina.nechyporenko@nure.ua<sup>2</sup>ХНУРЕ, м. Харків, Україна, george.zatserklyany@gmail.com

## КОМП'ЮТЕРНЕ ПЛАНУВАННЯ ОПЕРАТИВНИХ ВТРУЧАНЬ НА ОСНОВІ CFD-АНАЛІЗУ

Стаття присвячена розробці інформаційної технології планування оперативних втручань на основі CFD-аналізу, що дозволяє враховувати аеродинамічні властивості повітряного потоку крізь канал нерегулярної форми, а також просторові характеристики об'ємних моделей індивідуальних анатомічних конфігурацій. На основі розробленої інформаційної технології створено підсистему планування оперативних втручань, яка входить до складу ринологічної інформаційної системи. Використання запропонованого підходу дає змогу уникнути непотрібних втручань, а також зменшити фінансові витрати в умовах страхової медицини.

CFD-АНАЛІЗ, ТУРБУЛЕНТНИЙ РЕЖИМ ТЕЧІЇ, РИНОЛОГІЧНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА, КОМП'ЮТЕРНЕ ПЛАНУВАННЯ, ОПЕРАТИВНЕ ВТРУЧАННЯ, ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ

### Вступ

Порушення носового дихання — найбільш болючий симптом, який впливає на якість життя людини. Часто даний симптом пов'язаний з наявністю викривлення носової перетинки. За даними літературних джерел [1, 2] 25 % оперативних втручань від загальної кількості випадків, що проводяться згідно з існуючими протоколами, не є ефективними. Головними чинниками цього є наявність помилок прийняття рішення про втручання та відсутність єдиного системного підходу до комп'ютерного планування оперативних втручань. З одного боку існуючі системи хірургічної навігації та засоби інтраопераційної візуалізації дозволяють в режимі реального часу отримувати інформацію про анатомічні особливості пацієнта, розташування інструментів, стані патології і місце операційного втручання. З іншого боку — системи комп'ютерного планування ринохірургічних операцій, що базуються на модулях побудови та реконфігурації об'ємних моделей каналів нерегулярної форми. Однак сучасні системи не дозволяють досліджувати функціональні характеристики об'єкту втручання, які дуже важливі на етапі планування перебігу операції та є визначальними для результату втручання. Рішення про операцію приймається у відповідності до протоколу діагностичних процедур, який у більшості країн містить методи томографії (КТ і МРТ), дослідження носового повітряного потоку (риноманометрія, ринорезистометрія та ін.), акустична ринометрія [3]. Проте не усі викривлення потребують проведення септопластики. За даними останніх досліджень [4] оперативне втручання показане лише у випадках, коли має місце порушення аеродинаміки носової порожнини та у залежності від локалізації цього порушення.

Для визначення аеродинамічних характеристик доцільно проводити CFD (Computational Fluid Dynamics) моделювання руху повітря в носовій

порожнині. Математичний апарат, що застосовується для дослідження поточкових процесів у таких системах базується на рівняннях математичної фізики. Це дає змогу візуалізувати повітряний потік у носовій порожнині, яка є каналом нерегулярної форми, а також проаналізувати параметри потоку як нестационарного квазіперіодичного процесу. Таким чином, CFD — аналіз дозволяє проводити планування оперативних втручань з урахуванням аеродинамічних характеристик різноманітних конфігурацій каналів нерегулярної форми.

Сьогодні застосування CFD-аналізу має локальний, несистемний характер, що потребує формування відповідних вимог до проведення моделювання.

Таким чином, метою даної роботи є розробка єдиного системного підходу для дослідження поточкових процесів у каналах нерегулярної форми, що є основою стандартизації та відповідного інформаційно-технологічного забезпечення комп'ютерного планування оперативних втручань у ринології.

### 1. CFD-аналіз у каналах нерегулярної форми

Моделювання руху повітряного потоку через носову порожнину, яка є каналом нерегулярної форми пов'язано зі складністю математичного опису турбулентного режиму течії. Математична модель повинна бути тривимірною і враховувати пульсації миттєвих значень швидкості потоку в довільному напрямку. Даний факт обмежує можливості прямого чисельного моделювання, що вимагає великих обчислювальних потужностей. В даний час для таких досліджень активно використовується CFD-аналіз. Даний метод заснований на розрахунку характеристик повітряного потоку за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки.

Для проведення імітаційного моделювання на базі пакетів чисельного моделювання на першому етапі необхідно побудувати тривимірну модель



досліджуваного об'єкту. Формалізуємо цей процес на прикладі створення 3D моделі системи носового дихання. В зв'язку з цим виникає задача, яка полягає у виділенні носового каналу із наявної комп'ютерної томограми. По-перше було отримано томографічні зрізи, кожен 512x512 елементів зображення. Для роботи з такими даними доцільно використовувати додатки для масивно-паралельних обчислювальних пристроїв, де як вершинні буфери, що містять графічні примітиви, так і окремі фрагменти можуть оброблятися паралельно і незалежно один від одного. Це дозволяє оптимізувати обчислювальні і тимчасові витрати. На наступному етапі необхідно визначити метод розрахунку руху повітря у цьому каналі.

Для розв'язування першої задачі, тобто для виділення області носової порожнини використовувалося програмне середовище «3D Slicer». Програма є потужним інструментом відкритого доступу для аналізу комп'ютерних томограм, у даному випадку побудови 3D моделі каналу нерегулярної форми [5]. Інтерфейс користувача зображено на рис. 1.

З цією метою реалізується комплексна обробка вихідного набору томографічних зображень (СТ-сканів), яка включає в себе обробку зображення для згладжування імпульсного шуму за допомогою медіанного фільтру, формування сегментованого зображення за допомогою порогового фільтру, морфологічну фільтрацію для виділення контуру структур. Таким чином відбувається виділення областей повітряних структур. Для кожного осередку графічної матриці зрізу розраховується коефіцієнт абсорбції (коефіцієнт ослаблення, що виражається в одиницях Хаунсфілда, для повітря -1000 HU). Далі створюється 3D модель та будується мережа. Алгоритми тріангуляції реалізовані в таких професійних графічних пакетах 3D-моделювання, як «3D Studio MAX», «OpenGL Optimizer», «LightWave». Метод передбачає з'єднання між собою набору точок непересічними відрізками прямих ліній таким чином, щоб сформовані трикутники прагнули до

рівнокутності. Алгоритм працює шляхом постійного нарощування до поточної тріангуляції по одному трикутнику за крок. На кожній ітерації здійснюється пошук трикутника, який підключається до межі поточної тріангуляції. В результаті для побудови об'ємної моделі сегментовані елементи представляються у вигляді полігональної сітки, тобто всі зв'язкові компоненти повітряних структур на кожному томографічному зрізі послідовно з'єднуються між собою 3D Модель, отримана в результаті рендерингу зображено на рис. 2.

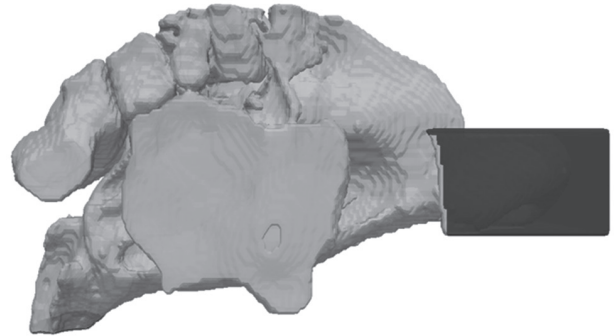


Рис. 2. 3D модель носової порожнини

Для проведення чисельного моделювання що базується на рішенні диференціальних рівнянь у частинних похідних застосовується метод скінченних об'ємів. Докладно реалізація цього методу описана в роботі [6]. Експериментальним шляхом визначено, що кількість елементів мережі моделі повинна бути у діапазоні  $Q(10^7)$  —  $Q(10^9)$  елементів, для забезпечення достатньої точності розрахунків. За допомогою програми «Blender» розділяються межі носового каналу: бокова поверхня, вхід і вихід, тобто ті межі, на яких потрібно при моделювання течії повітря задавати граничні умови.

На наступному етапі необхідно обрати математичну модель на основі рівнянь гідродинаміки, на базі якої здійснюється розрахунок потокових процесів та їх характеристик. Течія повітря в носовому каналі в рамках даного проекту розглядається

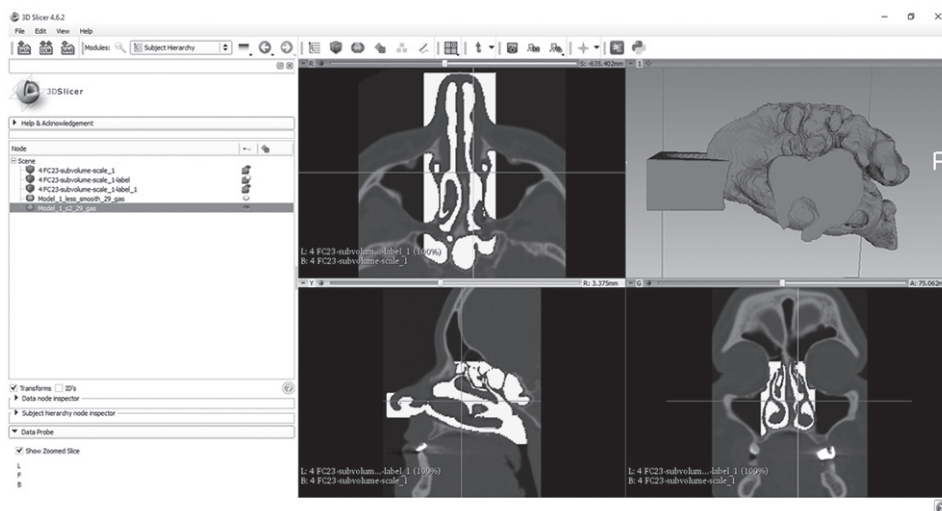


Рис. 1. Графічний інтерфейс користувача

в наближенні тривимірного нестационарного турбулентного потоку однорідного ізотермічного суцільного середовища. При таких умовах задачею моделювання є математичне формулювання законів збереження маси і кількості руху, доповнених рівнянням стану ідеального газу. Клапейрона. Ці рівняння записуються в інтегральній формі:

$$\begin{aligned}
 & \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \oint_S \rho \bar{U} d\bar{S} = 0, \\
 & \int_V \frac{\partial(\rho \bar{U})}{\partial t} dV + \oint_S \rho U_x \bar{U} d\bar{S} = \\
 & = -\oint_S \frac{P^*}{\rho} dS_x + \int_V g(\rho - \rho_h) dV + \oint_S \sigma_{xj} dS_j, \\
 & \int_V \frac{\partial(\rho \bar{U})}{\partial t} dV + \oint_S \rho U_y \bar{U} d\bar{S} = \\
 & = -\oint_S \frac{P^*}{\rho} dS_y + \int_V g(\rho - \rho_h) dV + \oint_S \sigma_{yj} dS_j, \\
 & \int_V \frac{\partial(\rho \bar{U})}{\partial t} dV + \oint_S \rho U_z \bar{U} d\bar{S} = \\
 & = -\oint_S \frac{P^*}{\rho} dS_z + \int_V g(\rho - \rho_h) dV + \oint_S \sigma_{zj} dS_j. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Моделювання турбулентності виконується на основі SST-моделі Ментера:

$$\begin{aligned}
 & \int_V \frac{\partial \rho k}{\partial t} dV + \oint_S \left[ \bar{U} n (\rho k) - (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial n} \right] dS = \\
 & = \int_V \rho (P_k - \beta^* k \omega) dV, \\
 & \int_V \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} dV + \oint_S \left[ \bar{U} n (\rho \omega) - (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial n} \right] dS = \\
 & = \int_V \rho \left( P_k - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) dV, \\
 & \mu_t = \frac{\rho k}{\omega}, \tau_{ij} = 2\mu_t S_{ij} - 2\bar{I} \frac{\mu_t \nabla \nabla + \rho k}{3}, \\
 & P_k = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, P_\omega = \frac{\gamma}{\mu_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

SST-модель на сьогодні є найбільш досконалою, оскільки однаково добре враховує вплив турбулентності на осереднені параметри і в пристінковій області, і в ядрі потоку. За числовий метод вибрано метод скінчених об'ємів. Докладно реалізація цього методу описана в роботі [3]. Ці рівняння можна записати в інтегральній формі [7] або за допомогою системи рівнянь Нав'є-Стокса і нерозривності [8]. Модель Ментера у деталях викладено у [9].

На боковій поверхні каналу граничною умовою є умова не проникнення і прилипання, тобто всі три компоненти вектору швидкості дорівнюють нулю, на вході задається тиск повітря в оточуючому

середовищі: одна атмосфера. На виході з каналу задаються дані, одержані експериментальним шляхом за допомогою програмно-апаратного комплексу для оцінки носового дихання "OPTIMUS" (свідоцтво державної реєстрації № 14777/2015 від 12.06.2015), (рис. 3).

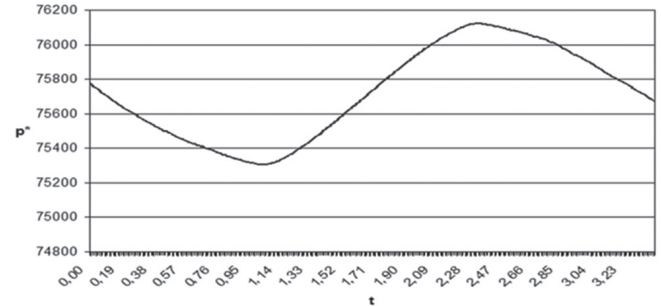


Рис. 3. Гранична умова на виході з каналу

Результати чисельного моделювання наведено на рис. 4, де показані лінії струму в носовому каналі та рис. 5, де зображено поля вектору швидкості в деяких перетинах цього каналу.

Time: 1.00

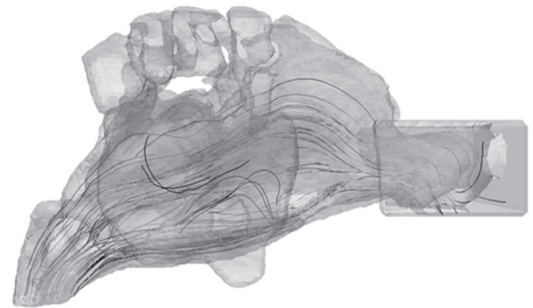


Рис. 4. Лінії струму в каналі

Time: 1.00



Рис. 5. Поля вектору швидкості в деяких перетинах каналу

## 2. Розробка інформаційної технології планування оперативних втручань

Однією з причин активного залучення сучасних інформаційних технологій в медичну галузь — можливість зниження витрат на надання медичної допомоги при поліпшенні якості послуг. Впровадження інформаційних технологій в медицину дозволяє не тільки підвищити ефективність роботи медичного персоналу, але і якість послуг,

що надаються пацієнтам. Ефективність впровадження інформаційних технологій в медичній сфері підтверджується результатами дослідження європейських та американських колег, які підготували і опублікували матеріали про результати ефективного впровадження інформаційних технологій в медичні установи, як приватного, так і державного характеру.

Грунтуючись на проведених дослідженнях розроблено інформаційну технологію планування оперативних втручань у ринології. За основу прийнята методологія функціонального моделювання IDEF0. Вихідними даними для обробки є дані CT-сканів у форматі DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine). Стандарт DICOM дозволяє вирішити завдання інтеграції на основі відкритої архітектури. DICOM дозволяє організувати пересилання даних по мережі та їх автоматичну обробку. Як результат значно зменшується час підготовки та проведення досліджень, управління зображеннями і відповідною інформацією. У якості правил, що регламентують вимоги до виконання відповідних функцій використовуються стандарт обміну, управління та інтеграції електронної медичної інформації HL7 (Health Level 7) та ринологічний стандарт «ISCOANA» [10]. Запропонована інформаційна технологія складається з процесів обробки зображень (постобробки CT-сканів), побудови об'ємної моделі нерегулярного каналу, розрахунку та візуалізації його гідродинамічних характеристик за допомогою CFD-аналізу, прийняття рішення про корекцію 3D моделі та формування рекомендацій щодо проведення оперативного

втручання. Постобробка зображень – це сукупність підпроцесів фільтрації та сегментації зображень які виконуються за допомогою автоматизованих систем. На наступному етапі будується об'ємна модель та її мережа. Далі обирається середовище чисельного моделювання та метод проведення розрахунків. Після цього задаються граничні умови та здійснюється CFD – моделювання. Результати моделювання поступають для аналізу експертом, який приймає рішення щодо необхідності корегування геометричних параметрів моделі. Після чого знову запускається процес CFD-моделювання на базі отриманої об'ємної моделі. Дані моделювання та конфігурації моделей зберігаються у вигляді рекомендацій, які використовуються лікарем для планування оперативного втручання.

Розроблену інформаційну технологію зображено на рис. 6.

Дана інформаційна технологія є основою підсистеми планування оперативних втручань ринологічної інформаційної системи [11]. Дана підсистема зв'язана з базою знань та блоком прийняття рішень, до якого входить комплекс математичних моделей обчислювального інтелекту, статистики, теорії прийняття рішень та ін. Система має сервіс-орієнтовану архітектуру, взаємодіє з низкою біологічних та технічних агентів та містить модулі введення, виведення, зберігання, обробки та аналізу інформації. Система може бути інтегрована у робоче місце спеціаліста в умовах лікарні та інших закладів охорони здоров'я. Медичні спеціалісти взаємодіють з платформою через графічний веб-інтерфейс користувача.

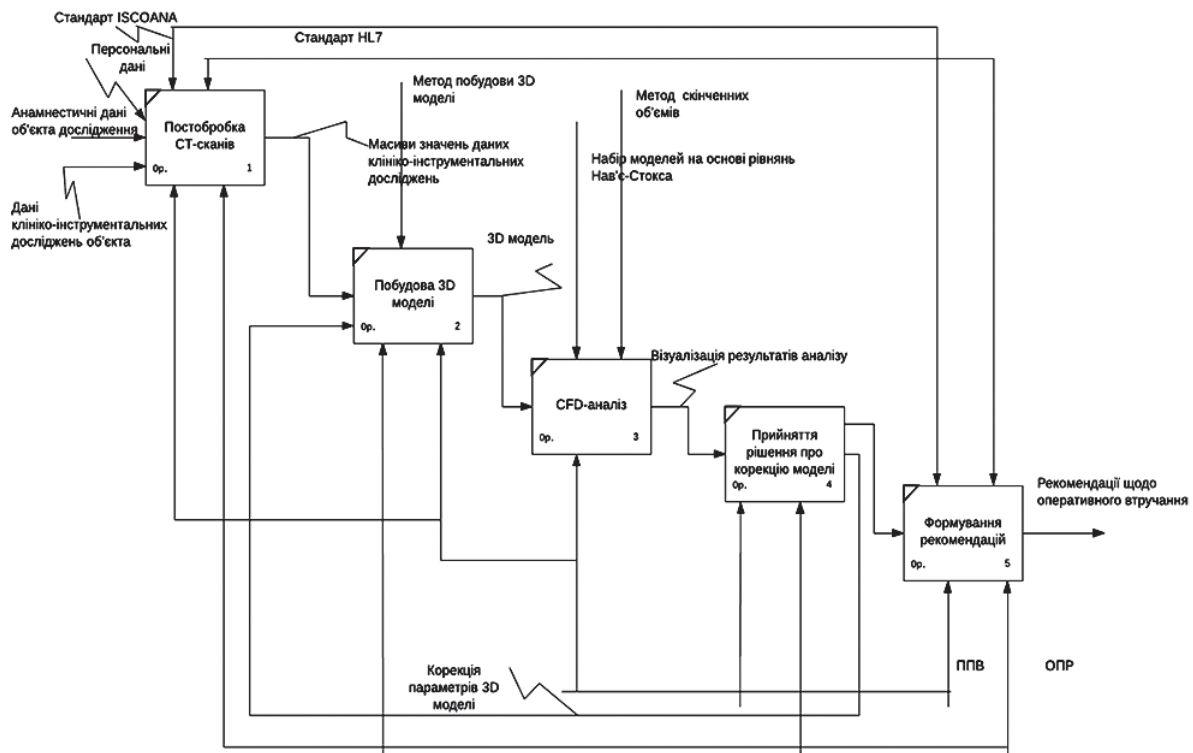


Рис. 6. Інформаційна технологія комп'ютерного планування оперативних втручань

### Висновки

Створену в результаті досліджень інформаційну технологію було впроваджено у клінічну практику лікаря-отоларинголога. За даними дослідження кількість незадовільних результатів оперативних втручань, тобто розладнань, які було виявлено через рік після втручання, що було призначене згідно стандартних протоколів суттєво відрізняється, а саме: на 14,9 % від результатів втручань, які було призначено на підставі аналізу гідродинамічного коефіцієнту опору носової порожнини та на 18,8 % — з використанням комплексного підходу, який містить розрахунок коефіцієнту опору та CFD-аналіз. Носова порожнина являє собою канал нерегулярної форми, в якому навіть при малих швидкостях спостерігається турбулентний режим, враховуючи цей факт течія повітря в носовому каналі розглядається в наближенні тривимірного нестационарного турбулентного потоку.

При прийнятті рішення про оперативне втручання доцільно використовувати розрахунок гідродинамічного коефіцієнту опору носової порожнини за даними риноманометричних досліджень у комплексі із моделюванням поточкових процесів за допомогою CFD.

Отже, розроблена інформаційна технологія планування оперативних втручань дозволяє підвищити ефективність запропонованого підходу для раннього визначення розладнань, що дасть змогу уникнути непотрібних втручань та запобігти зайвим фінансовим витратам в умовах страхової медицини, а також автоматизувати процес планування оперативних втручань. Запропоновану інформаційну технологію буде використано у процесі розробки нових стандартів оцінки носового дихання, основною метою яких є впровадження нових параметрів оцінювання, які основані на

розрахунку аеродинамічних показників та враховують індивідуальні властивості анатомічних конфігурацій.

### Список літератури:

1. *Clement P. A.* Standardisation Committee on Objective Assessment of the Nasal Airway. Consensus report on acoustic rhinometry and rhinomanometry / P.A. Clement, F. Gordts // *Rhinology*. — 2005. — 43. — P. 169–179.
2. *Thulesius H. L.*, Rhinomanometry in clinical use. A tool in the septoplasty decision making process : doctoral dissertation, clinical sciences / H.L. Thulesius — 2012. — 67 p. H. L.
3. *Malm L.* Guidelines for nasal provocations with aspects on nasal patency, airflow, and airflow resistance /L. Malm, R. G. v. Wijk, C. Bachert // International Committee on Objective Assessment of the Nasal Airways, International Rhinologic Society, "Rhinology, vol. 38(1), pp. 1-6, March.
4. *Чмовж В.В.* Аэродинамика носовой полости человека / В.В.Чмовж, О.Г. Гарюк, А.С. Нечипоренко // Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці", Київ, 26-29 травня, — 2015, с. 70-72.
5. *Quadrio M.* OpenNOSE: an open-source procedure for the simulation of nasal aerodynamics / M. Quadrio// *Anno Accademico 2012 – 2013*, — 118 p.
6. *Yerokhin A. L.* Heat and mass exchange analysis indoors / A.L. Yerokhin, H.A. Zatserklyanyi // Збірник наукових праць «Відбір і обробка інформації». -2016. — №44 (120), с. 51-55.
7. *Єрохін А.Л.* CFD-моделювання для оцінювання носового дихання / А.Л. Єрохін, А.С. Нечипоренко, Г.А. Зацеркляний // II Міжнародна науково-технічна конференція «Поліграфічні, мультимедійні та Web-технології» № 1, с.167-170, 2017.
8. *Чмовж В.В.* *Аэрогидродинамика. Часть 1.* Харьков: «ХАИ», — 2006 — 193 с.
9. *Menter F.R.* Two–Equation Eddy–Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications / Menter F.R. // *AIAA J.* — 1994. — 32, № 8. — P. 1598-1605.
10. *Clement P. A.* Committee report on standardization of rhinomanometry // *Rhinology*, vol. 22(3), pp.151-155, 1984.
11. *Nechyporenko A.* Intelligent decision-support system in rhinology / A. Nechyporenko // Системні технології № 6(107), 2016, с. 133-141.

Надійшла до редколегії 13.06.2017



УДК 004.42

Е.Б. Волощук<sup>1</sup>, О.М. Берест<sup>2</sup>, Е.Е. Гринева<sup>1</sup> ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, olena.voloshchuk@nure.ua<sup>2</sup> ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, olesia.berest@nure.ua

## РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОТОТИПА ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ Г. ХАРЬКОВА

Статья посвящена разработке и реализации прототипа информационно-аналитической системы для ведения учета в стационарных отделениях медицинских учреждений г. Харькова. Для этого был проведен анализ предметной области и существующих медицинских информационных систем, выявлены их сильные и слабые стороны. Также были сформулированы требования к системе, выбрана архитектура и средства реализации в соответствии со сформулированными требованиями. Кроме того, были определены роли пользователей системы в соответствии с профессиями пользователей в медицинских учреждениях и спроектирована база данных.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА, МЕДИЦИНСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ, БАЗА ДАННЫХ, РОЛЬ, ПОЛЬЗОВАТЕЛЬ

### Введение

В медицинской сфере от достоверности и актуальности данных зависят здоровье и жизнь пациентов. И к этим данным относится не только история болезни пациента, но и полный анамнез жизни, последние результаты анализов и функциональных исследований, результаты анализов в динамике, а также наличие или отсутствие медикаментов в медицинском учреждении.

На сегодняшний день в большинстве харьковских государственных медицинских учреждениях нет информационных систем, которые аккумулируют все данные, необходимые для быстрого и грамотного оказания медицинской помощи. Те же учреждения, которые используют собственные системы для ведения медицинского учета, имеют в распоряжении только данные, полученные в результате оказания медицинской помощи пациенту в данном медицинском учреждении. В случае повторной госпитализации пациента в связи с рецидивом заболевания (например, через год) либо с лечением в смежном стационарном отделении с другой нозологией, отсутствие структурированной системы сбора, хранения и обработки данных оказания медицинской помощи каждого конкретного пациента существенно замедляет процесс непосредственного оказания медицинской помощи.

Наличие единой информационной системы для всех медицинских учреждений позволит собрать всю необходимую для оказания медицинской помощи информацию в единой базе данных. Такой подход позволит лечащему врачу в любой момент получить всю необходимую информацию о пациенте. Кроме того, ведение учета медикаментов позволит вовремя осуществлять заказ дефицитных лечебных средств и их трансфер в установленном порядке из одного медицинского учреждения в другое. Учитывая, что в здравоохранении отсутствует утвержденная методика расчета стоимости оказания медицинской помощи, а сами подходы к лечению пациента сугубо индивидуальны, такая

система в дальнейшем позволит существенно облегчить расчеты стоимости лечения, определение потребности в финансовых ресурсах учреждения, переход к страховой медицине.

Стоит также отметить, что постоянное пополнение базы данных и хранение медицинских записей в формализованном виде позволит собирать статистику и проводить интеллектуальный анализ данных. На сегодняшний день медицинские записи пациентов хранятся в архивах и не доступны для оцифровки и анализа.

### 1. Анализ существующих медицинских систем

На сегодняшний день на украинском рынке информационных систем существует три медицинские информационные системы: «УниМед»[1], «Lakmus»[2], «Эмсимед»[3].

Система «УниМед» позволяет организовать регистрацию пациентов, систематизирование процесса обработки, протоколирование, хранение и оперативный доступ к карточкам пациентов, в которых хранятся все сведения о проведенных исследованиях, назначениях, процедурах и результатах, как в текстовой, так и в графической формах, с поддержкой современного медицинского стандарта DICOM-3.0. Может быть синхронизирована с практически любым типом медицинского оборудования. Система поддерживает работу с 4 языками (украинский, английский, русский, испанский). Для внедрения системы на рабочей станции должна быть установлена ОС Windows версии XP. Стоимость внедрения и сопровождения зависит от функциональных возможностей каждой рабочей станции.

«Lakmus» — это современная облачная система управления медицинским учреждением. Система позволяет организовать работу регистратуры, бухгалтерии, руководства. Также система предоставляет возможность работать со страховыми компаниями и лабораториями, вести учет пациентов поликлиники, хранить медицинские записи

каждого пациента. Вся вычислительная часть системы находится на защищённых, сверхмощных серверах. В качестве рабочей станции может быть использован компьютер или смартфон с возможностью выхода в Интернет. Оплата системы осуществляется в зависимости от количества приемов пациентов в месяц.

Медицинская информационная система «ЭМСИМЕД» представляет собой собираемое из модулей решение для автоматизации большинства процессов, происходящих в лечебно-профилактических учреждениях. Существуют модули для обеспечения работы регистратуры, аптечного склада, бухгалтерии, лаборатории, поликлинических и стационарных отделений, прочее. Для внедрения системы на рабочей станции должна быть установлена операционная система Windows, а также .NET Framework версии 3.5. Стоимость внедрения и сопровождения зависит от функциональных возможностей каждой рабочей станции.

К достоинствам рассмотренных систем стоит отнести:

- синхронизацию с медицинским оборудованием («УниМед»);
- многоязычность («УниМед»);
- поддержка стандарта DICOM-3.0 («УниМед», «ЭМСИМЕД»);
- простота внедрения («Lakmus»).

К недостаткам рассмотренных систем стоит отнести:

- одноплатформенность системы («УниМед», «ЭМСИМЕД»);
- сложность в обновлении («УниМед», «ЭМСИМЕД»);
- отсутствие гарантии безопасности хранимых данных («Lakmus»);
- отсутствие общего хранилища данных для нескольких медицинских учреждений («УниМед», «ЭМСИМЕД», «Lakmus»).

## 2. Постановка задачи

Анализ существующих систем показал, что на сегодняшний день не существует медицинской информационной системы, которая позволяла бы аккумулировать все медицинские данные пациента в одной базе данных, вне зависимости от того, в каком медицинском учреждении пациент проходил лечение. Более того, ни одна из существующих на сегодняшний день медицинских систем не предоставляет возможности для проведения интеллектуального анализа собранных данных. Таким образом, целью авторов данной статьи является разработка и реализация прототипа информационно-аналитической системы для ведения учета в стационарных отделениях медицинских учреждений г. Харькова.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- обобщение и формализация данных предметной области;

- выбор средств реализации;
- проектирование базы данных;
- определение перечня ролей пользователей системы и прав доступа в соответствии с ролью;
- разработка интерфейса пользователей;
- частичная реализация функционала системы.

Требования к системе:

- обеспечение безопасности хранимых данных пациентов;
- соответствие справочной информации системы действующему законодательству Украины и нормативно-правовым актам, которые определяют деятельность предприятий, учреждений и организаций здравоохранения;
- хранение данных в формализованном виде;
- обеспечение целостности данных;
- тонкое разграничение прав доступа пользователей;
- возможность получения данных в любой момент времени в соответствии с правами доступа пользователя.

## 3. Архитектура системы и средства реализации

Информационно-аналитическая система будет иметь трехуровневую архитектуру. Трёхуровневая архитектура – архитектурная модель программного комплекса, предполагающая наличие в нём трёх компонентов: клиента, сервера приложений (к которому подключено клиентское приложение) и сервера баз данных (с которым работает сервер приложений).

Схема трехуровневой архитектуры представлена на рис. 1.

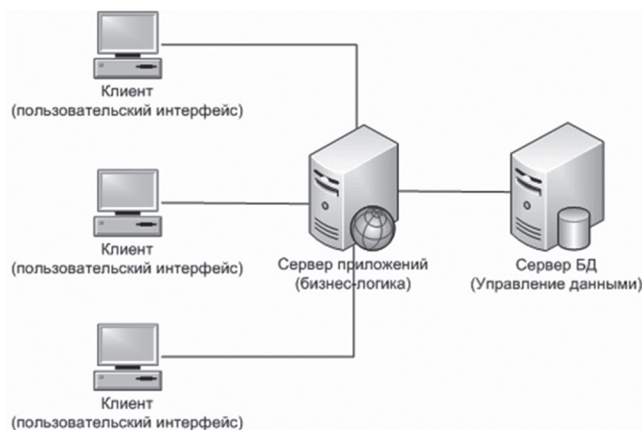


Рис. 1. Трёхуровневая архитектура информационной системы

После проведения анализа предметной области и формулирования требований к системе было принято решение использовать СУБД Oracle 11g Enterprise edition[4]. Выбор данной СУБД связан с обеспечением высокой безопасности и сохранности данных, что является самым главным требованием к системам медицинского сектора. Кроме того, СУБД данной версии не имеет ограничений по объему хранимых данных и включает в себя интегрированный комплекс аналитических

инструментов, позволяющих осуществлять интерактивную аналитическую обработку данных.

Для обеспечения максимальной сохранности данных предполагается использование компонента Oracle Advanced Security. Oracle Advanced Security обеспечивает прозрачное шифрование данных, хранящихся в базе, а также перемещающихся по сети. Все соединения СУБД Oracle могут быть зашифрованы с помощью OAS. Опция OAS позволяет защищать все входящие и исходящие соединения СУБД Oracle. Для каждого соединения создается секретный ключ, обеспечивающий безопасность всего сетевого трафика. OAS делает невозможным скрытую модификацию, добавление или удаление части передаваемых данных.

Для проведения интеллектуального анализа данных необходим компонент Oracle Advanced Analytics. Продукт Oracle Advanced Analytics реализует концепцию аналитики, встроенной в базу данных, перемещая алгоритмы к данным, хранящимся в Oracle Database 11 g и Oracle Exadata. Это отличается от традиционного подхода, основанного на перемещении данных к алгоритмам и требующего дополнительных затрат на извлечение данных из хранилищ и их загрузку в ноутбуки или специализированные сервера. На основе Oracle Advanced Analytics можно создавать аналитические приложения в режиме реального времени, которые помогают получать ответы на ключевые вопросы бизнеса. Выполнение аналитических алгоритмов непосредственно в базе данных Oracle Database 11 g, т.е. там же, где хранятся данные, позволяет повысить производительность аналитической системы и обеспечить ее безопасность в масштабе всего предприятия.

В качестве интерфейса системы было выбрано веб-приложение, так как каждая рабочая станция в любом медицинском учреждении должна иметь возможность в любой момент получить информацию из общего хранилища данных. Другой аргумент в пользу веб-приложения – централизованная настройка и обновление системы. Кроме того, веб-приложения платформо-независимые, что позволит сэкономить средства при внедрении системы. Средой разработки интерфейса системы был выбран Oracle Application Express (Oracle APEX)[5]. Он представляет собой свободную среду для быстрого создания и разворачивания веб-приложений, которая позволяет разрабатывать быстрые и надежные профессиональные приложения, используя для этого лишь только веб-браузер.

#### 4. Определение ролей пользователей

Система предполагает тонкое разграничение прав доступа для различных категорий пользователей. Первая категория – контент менеджеры, к ним будут относиться рабочий персонал медицинского учреждения, а именно врачи, медсестры, фармацевты, лаборанты. В процессе выполнения своих обязанностей, они будут получать

персонализированную информацию и вносить в систему новые данные о пациентах, которые позже будет анализировать пользователи второй категории. Ко второй категории относятся эксперты-медики. Эта категория пользователей будет получать обезличенные данные. Существует также третья категория пользователей – администраторы системы. К ним относятся администраторы БД, а также разработчики приложения.

В рамках данной статьи будут определены роли первой категории пользователей. Согласно справочнику квалификационных характеристик профессий сотрудников системы здравоохранения, утвержденному приказом Министерства здравоохранения 28.10.2002 №345[6,7], сотрудники системы здравоохранения делятся на следующие категории:

- специалисты;
- профессионалы;
- профессионалы в области медико-профилактического дела;
- профессионалы в области стоматологии;
- профессионалы в области фармации;
- рабочие;
- технические служащие;
- руководители;
- другие профессионалы в области медицины.

В рамках данной работы будут рассмотрены только те профессии, которые непосредственно относятся к процессу оказания медицинской помощи пациентам в стационарных условиях, а также профессии, в перечень обязанностей которых входит организация процесса оказания медицинской помощи. В табл. 1 представлены профессии сотрудников здравоохранения в соответствии с категориями.

Таблица 1

Рассмотренные профессии в соответствии с категориями справочника квалификационных характеристик

Категория	Профессии
Руководители	– главный врач; – заместитель главного врача; – заведующий отдела (аптеки, базы аптечной); – заведующий лаборатории (контрольно-аналитической); – заведующий отделением.
Профессионалы	– врач (с указанием специальности); – врач по ультразвуковой диагностике; – врач по радионуклидной диагностике.
Другие профессионалы в области медицины	– врач-лаборант; – врач по функциональной диагностике; – врач-эндоскопист; – врач-рентгенолог.
Профессионалы в области фармации	– провизор.
Специалисты	– лаборант; – фармацевт; – старшая медицинская сестра.



Роли пользователей определяются в соответствии с профессиями сотрудников медицинского учреждения. Каждый пользователь получает информацию, которая соотносится непосредственно к его медицинскому учреждению и структурному подразделению. В табл. 2 представлены профессии в соответствии с ролью пользователя в системе.

Таблица 2

**Профессии сотрудников медицинских учреждений в соответствии с ролью пользователя в системе**

Роль	Профессия
«Главный врач»	– главный врач; – заместитель главного врача;
«Заведующий отделением»	– заведующий отделением.
«Сотрудник аптеки»	– заведующий отдела (аптеки, базы аптечной); – фармацевт; – провизор.
«Сотрудник лаборатории»	– заведующий лаборатории (контрольно-аналитической); – врач-лаборант; – лаборант;
«Лечащий врач»	– врач (с указанием специальности).
«Врач приемного отделения»	– врач приемного отделения.
«Старшая медицинская сестра»	– старшая медицинская сестра.
«Врач-исследователь»	– врач радионуклидной диагностики; – врач по ультразвуковой диагностике; – врач по функциональной диагностике; – врач рентгенолог; – врач-эндоскопист.

### 5. Проектирование базы данных

Процесс проектирования базы данных был разбит на несколько этапов, в соответствии с характеристикой хранимых в таблицах данных. Так схема базы данных состоит из 7 фрагментов, которые логически связаны между собой за счет наличия общих таблиц и связей между ними.

Фрагмент схемы базы данных «Устройство медицинского учреждения» включает в себя ряд таблиц, связей и ограничений, которые характеризуют внутреннюю структуру медицинских учреждений. Этот фрагмент описывает медицинское учреждение, лабораторию, аптеку, отделения, их профили, палаты и койки, сотрудников, их профессии и роли, распределение сотрудников по медицинским учреждениям и структурным подразделениям.

Фрагмент схемы базы данных «Устройство аптеки» включает в себя ряд таблиц, связей и ограничений, которые описывают принципы функционирования аптеки. Этот фрагмент описывает препараты и изделия медицинского назначения в соответствии с АТС[8], группами медицинского

учета, формами выпуска, дозировками и т.д. Также в данном фрагменте схемы базы данных описан процесс поступления препаратов и изделий медицинского назначения в аптеку медицинского учреждения и последующие распределение препаратов на структурные подразделения.

Фрагмент схемы базы данных «Устройство лаборатории» включает в себя ряд таблиц, связей и ограничений, которые описывают принципы функционирования лаборатории, а именно анализы и их параметры в соответствии с заборным материалом, граничные значения каждого из параметров анализа, расходы реагентов на проведение анализов.

Фрагмент схемы базы данных «Анамнез жизни пациента» включает в себя ряд таблиц, связей и ограничений, которые описывают важные для медицины стороны жизни пациента. Этот фрагмент включает паспортные данные пациента, информацию о хронических и перенесенных заболеваниях в соответствии Международным классификатором болезней 10-го пересмотра (МКБ-10)[9], информацию об аллергиях, присвоении группы инвалидности, диспансерном учете и прочее.

Фрагмент схемы базы данных «Операции, исследования, процедуры» включает в себя ряд таблиц, связей и ограничений, которые включают в себя справочную информацию об операциях, медицинских процедурах и исследованиях.

Фрагмент схемы базы данных «История болезни: документация» включает в себя ряд таблиц, связей и ограничений, которые содержат данные, необходимые для формирования документов. К документам относятся формы 003/о – медицинская карта стационарного больного и 066/о – карта пациента, который выбыл из стационара, утвержденные Приказом Министерства здравоохранения Украины 14.02.2012 №110 (в редакции Приказа Министерства здравоохранения Украины 21.01.2016 № 29)[10]. Этот фрагмент содержит данные для ведения статистики, например, с каким результатом пациент выписался из стационара, а также общие сведения о прохождении лечения: стационарное отделение, лечащий врач, время поступления и выписки.

Фрагмент схемы базы данных «История болезни: назначения» включает в себя ряд таблиц, связей и ограничений, которые содержат информацию о назначении медикаментов, процедур и операций. В данном фрагменте описано, какие медикаменты были назначены пациенту, какие и когда были приняты, а также информация о проведенных исследованиях и операциях, кем они были проведены и результаты.

### 6. Разработка интерфейса

В рамках данной работы был разработан и частично реализован функционал для двух типов пользователей – врача приемного отделения и администратора. Все страницы веб-приложения



являются закрытыми для неавторизованного пользователя, при попытке получения доступа к веб-приложению появляется страница аутентификации. При успешной аутентификации, осуществляется авторизация пользователя. Если пользователь является администратором системы, он попадает на страницу с перечнем всех медицинских учреждений, зарегистрированных в системе, представленную на рис. 2.

Рідкувати	Назва	ЄДРПОУ	Інформація	Адрес
	Обласний клінічний центр урології та нефрології ім. В. І. Шанова	1234544		Харківська область, Харківський район, Харків, Московський проспект, 195
	Харківська обласна клінічна лікарня	1234579		Харківська область, Харківський район, Харків, проспект Незалежності, 13
	ЦКСМЗ	1234578		Харківська область, Харківський район, Харків, провулок Баварська, 5

Рис. 2. Страница с перечнем всех медицинских учреждений

Администратор имеет возможность перемещаться между страницами системы, используя меню в левой части экрана, представленное на рис. 3.

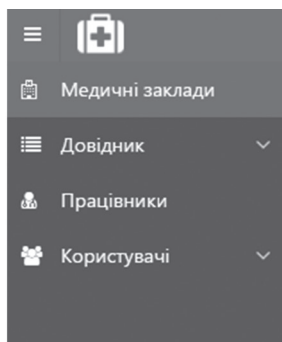


Рис. 3. Меню пользователя с ролью «Администратор»

Администратор может вносить справочную информацию в систему, добавлять сотрудников медицинского учреждения и распределять их между структурными подразделениями в соответствии с их профессиями, а также создавать пользователей. На рис. 4 представлена страница с перечнем справочной информации в системе, разбитой на категории.

Для документації	Аптека
Коди країн	Розмірності
Результат лікування	Форма випуску
Відновлення працездатності	Одиниці вимірювання
Пильова категорія	АТС коди
Резистентність	Групи медичного обліку
Лікування онкології	Каталог найменувань
Співпаданні діагнозів (у випадку смерті)	Довідник найменувань (за формою випуску)
Причини розбіжності діагнозів (у випадку смерті)	Виробники
Документи, що засвідчують особу	Каталог препаратів та медичних засобів (за виробниками)
Загальне	Лабораторія
Типи відділень	Досліджувані матеріали
Перелік професій	Анализи

Рис. 4. Страница «Справочник»

Если аутентифицированный пользователь является врачом приемного отделения, то система определяет, к какому медицинскому учреждению принадлежит сотрудник, после чего пользователь с ролью «Врач приемного отделения» попадает на

страницу «Регистратура» с перечнем всех пациентов, поступивших на лечение в медицинское учреждение через приемное отделение, к которому относится пользователь. Интерфейс данной страницы представлен на рис. 5.

Для документації	Аптека
Коди країн	Розмірності
Результат лікування	Форма випуску
Відновлення працездатності	Одиниці вимірювання
Пильова категорія	АТС коди
Резистентність	Групи медичного обліку
Лікування онкології	Каталог найменувань
Співпаданні діагнозів (у випадку смерті)	Довідник найменувань (за формою випуску)
Причини розбіжності діагнозів (у випадку смерті)	Виробники
Документи, що засвідчують особу	Каталог препаратів та медичних засобів (за виробниками)
Загальне	Лабораторія
Типи відділень	Досліджувані матеріали
Перелік професій	Анализи

Рис. 5. Страница «Регистратура»

Врач приемного отделения имеет возможность перемещаться между страницами системы, используя меню, представленное на рис. 6.

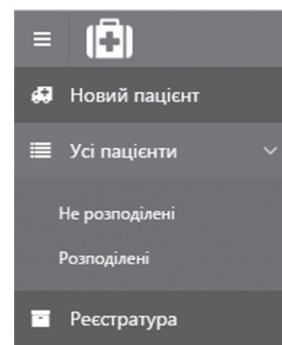


Рис. 6. Меню пользователя с ролью «Врач приемного отделения»

Врач приемного отделения имеет возможность добавлять данные о новом пациенте и вносить информацию о поступлении пациента на стационарное лечение, включая заполнение данных анамнеза жизни, анамнеза болезни, определение диагноза при госпитализации и распределение пациента к конкретное медицинское учреждение. На рис. 7 представлена страница поиска пациента по паспортным данным.

ПІБ	Дата Народження	Паспорт	Обрати
Кошопан Степан Васильович	12.12.1967	BM 123456	Обрати
Сторона Василь Вікторович	07.06.1956		Обрати

Рис. 7. Страница поиска пациента по паспортным данным

## Выводы

В статье описан процесс разработки и частичной реализации прототипа информационно-аналитической системы для медицинских учреждений г. Харькова. Данный прототип может быть

использован для разработки полноценной информационно-аналитической системы, направленной на улучшение функционирования стационарных отделений медицинских учреждений города Харькова. Процесс разработки включал анализ предметной области, определение основных процессов предметной области, которые нуждаются в автоматизации, а также участников этих процессов.

Кроме того, были рассмотрены существующие на рынке медицинские информационные системы. Не смотря на то, что на украинском рынке уже существуют информационные системы, направленные на удовлетворение нужд медицинского сектора, они обладают рядом недостатков, главными из которых являются одноплатформенность систем, а также отсутствие возможности создания единой базы данных для всех медицинских учреждений города.

Также в процесс разработки прототипа входил этап определения групп пользователей системы. Другой этап разработки – проектирование базы данных системы с учетом всех особенностей предметной области. Были выбраны средства реализации, возможности которых позволяют снизить затраты на обслуживание системы, а также сэкономят время при ее обновлении.

На этапе реализации прототипа информационно-аналитической системы был разработан интерфейс пользователей с ролями «Администратор» и «Врач приемного отделения», а также частично реализован функционал для данных видов пользователей.

#### Список литературы:

1. УниМед – медицинская информационная система для госпиталя [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.unimed.com.ua/> – 2012 г. – Загл. с экрана.
2. Lakmus. Медицинская информационная система [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://lakmus.org/> – 2016 г. – Загл. с экрана.
3. Что такое «ЭМСИМЕД» [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.mcmed.ua/ru/about> – 2016 г. – Загл. с экрана.
4. Oracle Database Enterprise Edition 11g [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.interface.ru/home.asp?artId=25106> – 27.01.2011 г. – Загл. с экрана.
5. Введение в Oracle Application Express [Электронный ресурс] / Статья написана на основе официальной документации фирмы Oracle – Режим доступа: <http://www.orahome.ru/ora-apex/42> – 11.13.2007 г. – Загл. с экрана.
6. Наказ Міністерства охорони здоров'я України про затвердження переліків закладів охорони здоров'я, лікарських, провізорських посад та посад молодших спеціалістів з фармацевтичною освітою у закладах охорони здоров'я №345 [Електронний ресурс] / Режим доступа: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0892-02> – 10.03.2017 г. – Загл. с экрана <http://www.jurnal.org/articles/2009/inf32.html>.
7. Довідник кваліфікаційних характеристик професій працівників: Вип. 78 «Охрана здоров'я» / Міністерство охорони здоров'я України; Міністерство праці та соціальної політики України. – К., 2002. – 372 с.
8. Анатомо-терапевтическо-химическая классификация (АТС) [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://compendium.com.ua/atc> – 2017 г. – Загл. с экрана.
9. Анатомо-терапевтическо-химическая классификация (АТС) [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://compendium.com.ua/atc> – 2017 г. – Загл. с экрана.
10. Наказ Міністерства охорони здоров'я України про внесення змін до первинних облікових форм та інструкцій щодо їх заповнення № 29 [Електронний ресурс] / Режим доступа: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0230-16> – 21.01.2016 г. – Загл. с экрана <http://www.jurnal.org/articles/2009/inf32.html>.

*Поступила в редколлегию 16.06.2017*

УДК 004.652:004.85



О.А. Мазурова, М.А. Семикин, М.С. Широкопетлева  
ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, oksana.mazurova@nure.ua  
ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, maksym.semikin@gmail.com  
ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, marija.shirokopetleva@nure.ua

## ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БАЗ ДАННЫХ

Работа посвящена разработке математической модели и обучающего веб-приложения для поддержки процесса проектирования баз данных. Предложено математическое описание процесса проектирования базы данных, которое моделирует взаимосвязь этапов анализа предметной области, концептуального, ER- и логического моделирования баз данных. Для моделирования связи между основными составляющими рассмотренных моделей базы данных использованы базовые понятия сущности и атрибута базы данных. На основании математического описания предложен алгоритм и разработана обучающая система поддержки проектирования баз данных.

БАЗА ДАННЫХ, КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ER-МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, СУЩНОСТЬ, АТТРИБУТ, ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА

### Введение

Одним из направлений повышения эффективности обучения на сегодня является разработка и использование компьютерных обучающих систем (особенно, обучающих веб-приложений), возможности которых позволяют персонализировать обучение и повысить к нему интерес.

Дисциплина «Базы данных» является одной из нормативных дисциплин цикла профессиональной подготовки бакалавров в области компьютерных наук и программной инженерии. Вопросы проектирования баз данных (БД) являются основой данной дисциплины и требуют не только теоретического, но и практического их освоения во время практических, лабораторных работ и курсового проектирования. Особое внимание при обучении вопросам проектирования БД необходимо уделить этапу концептуального моделирования (КМ) БД, который является достаточно творческим и существенно зависит от знаний и опыта разработчика.

Современные CASE-средства проектирования БД, такие как Vignal Paradigm, ERVisio, ERWin и другие, не поддерживают этап КМ, который традиционно относится к бумажной стадии проектирования БД. Такие профессиональные средства не могут эффективно использоваться на этапе обучения вопросам проектирования БД. Таким образом, существует потребность в разработке обучающего веб-приложения, которое поможет поддержать процесс обучения студентов всем этапам проектирования БД.

Концептуальное моделирование БД предполагает структурированное описание различных аспектов будущей БД и разрабатываемой информационной системы (ИС) [1, 2]. КМ базируется на результатах анализа предметной области (ПО) разработки, который чаще всего включает анализ разнообразной входной документации. Автоматизированная поддержка анализа такой документации [3] позволит выявить ключевые слова,

взаимосвязи и закономерности, которые могут быть учтены во время КМ и использованы для поддержки обучения. Для выявления ключевых слов целесообразно использовать подход на базе соединения статистического и лингвистического анализа текста [3], которые позволят учесть встречаемость слов в текстах, а также отношения между словами.

Современные обучающие системы, такие как Coursera, Edx, Udacity, TrainingWare, Moodle, охватывают различные аспекты обучения в привычной «школьной» парадигме «материал-упражнения» и ориентированы на широкую целевую аудиторию. Однако, актуальной является разработка систем, обучающих с учетом задачно-целевого или ситуативно-проблемного направлений. Например, обучающая система может быть построена для решения с ее помощью практической задачи проектирования БД в рамках курсового проектирования. В этом случае студенты вовлекаются в творческий процесс, в ходе которого, не только закрепляют полученную во время изучения дисциплины информацию, но и превращают ее в организованное знание.

### 1. Постановка задачи

В работе была поставлена задача разработать обучающее веб-приложение, которое позволит поддержать студента на основных этапах проектирования БД в рамках выполнения курсового проекта по дисциплине «Базы данных».

Для достижения поставленной цели необходимо:

- разработать математическую модель для описания процесса проектирования БД, которая моделирует связь основных этапов проектирования;
- разработать алгоритм использования модели для поддержки процесса проектирования БД;
- разработать обучающую систему, которая позволит поддержать начинающего разработчика БД на основных этапах проектирования БД.

## 2. Математическое описание процесса проектирования базы данных

Процесс проектирования БД можно представить как множество  $DB = \{AN, CM, ER, LM, FM\}$  этапов анализа ПО  $AN$ , концептуального  $CM$ , ER (инфологического)  $ER$ , логического  $LM$  и физического  $FM$  моделирования.

Анализ ПО  $AN$  проводится на основании результатов интервьюирования представителей заказчика и анализа входной документации  $Doc$ , к которой следует отнести спецификации требований, описания бизнес-процессов, корпоративные или отраслевые стандарты, и т.п.. Документация в ПО может быть представлена в виде  $Doc = \{Doc_k(W, Wd)\}$ , где  $W$  – набор слов, входящих в документ,  $Wd$  – зависимости или связи между словами.

Процесс КМ заключается в выделении концептуальных (понятийных) составляющих ПО создания БД: сущностей, их атрибутов, связей между ними, закономерностей и т.п. [1, 2]. Все составляющие КМ могут быть промоделированы с учетом базовых в области БД понятий сущности и атрибута:

- $A = \{a_{ij}\}$  – множество атрибутов сущностей;
- $E = \{e_i(\ )\}$  ( $i = \overline{1, n}$ ) – множество сущностей  $S_i(\ )$  ПО, которые характеризуются атрибутами из множества  $A$ .

Таким образом, концептуальная модель БД в общем виде может быть описана, как совокупность:

$$CM = \{FS, ID, SN, DM, IC, AR, LR, SR\},$$

где  $FS$  – описание функциональной структуры проектируемой системы;  $ID$  – описание информационных потребностей пользователей;  $SN$  – описание схемы взаимосвязи объектов ПО;  $DM$  – описание документооборота в системе;  $IC$  – описание ограничения целостности ПО;  $AR$  – описание алгоритмических зависимостей в ПО;  $LR$  – описание лингвистических зависимостей в ПО;  $SR$  – описание требования к ИС в целом.

С учетом основополагающей роли сущностей и атрибутов может быть предложено следующее описание составляющих КМ:

- описание функциональной структуры ИС  $FS = \{Act, Pr\}$  может быть проведено в виде use-case диаграммы языка UML, как множество акторов  $Act = \{Act_i\}_{i=1, n}$  и их прецедентов  $Pr = \{Pr_j(Act_i)\}_{j=1, m; i=1, n}$ ;

– описание информационных потребностей  $ID = \{ID_i\}_{i=1, n}$  пользователей, где  $ID_i = \{SSF_i, Stat_i, Auto_i\}$  – информационные потребности актора  $Act_i$ , которые традиционно для ИС включают:

- а)  $SSF_i = \{Sh_i, St_i, Fr_i\}$  – потребности в поиске  $Sh_i = \{Sh_i^j(E, A)\}$ , сортировке  $St_i = \{St_i^k(E, A)\}$  и фильтрации  $Fr_i = \{Fr_i^p(E, A)\}$  сущностей  $E$  по атрибутам  $A$ ;

б)  $Stat_i = \{Stat_i^k(E, A)\}$  – потребностей в получении статистики на базе атрибутов  $A$  сущностей  $E$ ;

в)  $Auto_i = \{Auto_m^i(E, A)\}$  – потребности в автоматизации, во время проведения которой используются те или иные атрибуты  $A$  сущностей  $E$ .

– схема взаимосвязи  $SN$  сущностей и атрибутов  $SN = \{RE_{kl}\}$ , где  $RE_{kl} = \langle e_k, e_l, R_i \rangle$  – взаимосвязь между сущностями  $e_k$  и  $e_l$ , где  $R_i$  – тип связи между этими сущностями;

– описание документооборота системы  $DM = \{Doc_i(E, A)\}$  может быть представлено как множество документов  $Doc_i(E, A)$ , которые содержат отчетную информацию на базе значений атрибутов  $A$  сущностей  $E$ ; поскольку такие документы могли выступать исходной документацией, на которой проводился анализ ПО, то  $DM \cap Doc$ ;

– описание алгоритмических зависимостей  $AR = \{AR_i(V, E, A)\}$  задает зависимости между некоторыми вычисляемыми атрибутами  $V$  и атрибутами  $A$  сущностей  $E$ , на основании которых они вычисляются.

В процессе концептуального проектирования БД могут быть сформулированы функциональные и ряд нефункциональных требований, которые в той или иной мере касаются объектов (сущностей) ПО. Таким образом, может быть предложен следующий минимальный набор требований:

$$SR = \{dV, dSh, dSt, dFr, dStat, dAuto, dDM, dAR, dMDB, dTR\},$$

где  $dV = \{dV_m(E, A)\}$  – требование наличия функции отображения в ИС данных об основных сущностях  $E$  и их атрибутах  $A$ ;

–  $dSh, dSt, dFr$  – требования наличия функций поиска, сортировки и фильтрации сущностей по их атрибутам, причем  $Sh_i \subset dSh, St_i \subset dSt, Fr_i \subset dFr$ ;

–  $dStat$  – требование наличия функции получения статистик на базе атрибутов сущностей ( $Stat_i \subset dStat$ );

–  $dAuto$  – требование наличия задачи автоматизации в ПО ( $Avto_i \subset dAvto$ );

–  $dDM$  – требование наличия функций формирования выходных отчетов ( $dDM \subset DM$ );

–  $dAR$  – требование наличия функции формирования вычисляемых полей на базе алгоритмических зависимостей ( $dAR \subset AR$ );

–  $dMDB$  – требования к СУБД;

–  $dTR$  – требования к текстовым редакторам для вывода отчетных документов из  $DM$ .

Сущности и атрибуты являются наиболее важными ключевыми понятиями КМ, т.к. служат основой для описания практически всех ее составляющих. Поэтому поддержка на этапе выбора этих ключевых понятий позволит облегчить весь процесс КМ. Для поиска слов, которые можно рекомендовать в качестве сущностей или атрибутов БД, можно использовать статистический подход (метод подсчета TF-индекса) [3, 4] в соединении с методами синтаксического анализа текстов для



моделирования связи между сущностями и атрибутами. Показатель TF (англ. *term frequency* – частота слова) – статистическая мера, которую можно использовать для оценки важности слова в контексте документа  $Doc_k(W, Wd)$ . Она определяется как отношение числа входжений  $n_i$  некоторого слова  $W_i$  к общему количеству слов  $\sum_k n_k$  документа  $tf(W_i, Doc_k) = \frac{n_i}{\sum_k n_k}$ .

Таким образом, множество сущностей  $E$  может быть выбрано из множества лексем  $W$  документа  $Doc_k(W, Wd)$  с учетом их принадлежности множеству существительных  $Wn$  ( $Wn \subset W$ ,  $E \subset Wn$ ). Итак, лексема  $W_i \in W$  может быть рекомендована в качестве сущности  $e_j \in E$ , в том случае, если она является существительным  $e_j \in Wn$  и  $tf(W_i, Doc_k) = tf(e_j) \geq tfe_{\min}$ , где  $tfe_{\min}$  – минимальная частота встречаемости сущностей в текстах ( $tfe_{\min}$  может быть получена опытным путем).

Множество атрибутов  $A$  также может быть сформировано на базе документа  $Doc_k(W, Wd)$  как конечное множество слов, которые принадлежат существительным, а также связаны с сущностями словами-связями из  $RE$ , которые являются глаголами  $Wv$  ( $Wv \subset W$ ,  $RE \subset Wv$ ). Т.е. лексема  $W_i \in W$  может быть рекомендована в качестве атрибута  $a_{ij} \in A$  сущности  $e_j \in E$ , в том случае, если она является существительным  $a_{ij} \in Wn$ , связана с сущностью  $e_j$  словом-связью  $RE(e_j, a_{ij})$ , который является глаголом  $RE(e_j, a_{ij}) \in Wv$ , и  $tf(W_i, Doc_k) = tf(a_{ij}) \geq tfa_{\min}$ , где  $tfa_{\min}$  – минимальная частота встречаемости атрибутов в текстах.

Процесс инфологического (ER) моделирования является необязательным этапом проектирования БД, но достаточно наглядным и полезным этапом в ходе обучения этому процессу. Сущности, атрибуты и взаимосвязи между сущностями в ER-модели могут быть описаны на основании соответствующих понятий из ранее построенной концептуальной модели  $CM$ . Таким образом, ER-модель БД в общем виде может быть описана, как:

$$ER = \{E', A', SN'\},$$

где  $E' = \{e'_i(A')\}$  ( $i = \overline{1, m}$ ) – множество сущностей  $e'_i(A')$ , которые характеризуются атрибутами из множества  $A'$  (причем  $E \subset E'$ );  $A' = \{a'_{ij}\}$  – множество атрибутов сущностей (причем  $A \subset A'$ ); схема взаимосвязи  $SN' = \{RE'_{kl}\}$  сущностей, где  $RE'_{kl} = \langle e'_k, e'_l, R'_i \rangle$  – взаимосвязь между сущностями  $e'_k$  и  $e'_l$ ,  $R'_i$  – тип связи между этими сущностями (причем  $SN \subset SN'$ ).

В ходе логического моделирования реляционной БД отношения, их атрибуты и взаимосвязи между реляционными отношениями могут быть

получены на основании соответствующих понятий из ранее построенной ER-модели  $ER$ . При этом новые отношения, атрибуты и связи могут возникнуть в результате проведения нормализации логической модели. В случае, если процессу нормализации подверглась ER-модель, то в ходе логического моделирования новые отношения не появятся.

Логическая модель БД в общем виде может быть описана, как множество:

$$LM = \{T, A'', SN''\},$$

где  $T = \{t_i(A'')\}$  ( $i = \overline{1, p}$ ) – множество реляционных отношений  $t_i(A'')$ , которые определены на атрибутах из множества  $A''$  (причем  $E' \subseteq T$ );  $A'' = \{a''_{ij}\}$  – множество атрибутов ( $A' \subseteq A''$ ); схема взаимосвязи  $SN'' = \{RT_{kl}\}$  отношений, где  $RT_{kl} = \langle t_k, t_l, R'_i \rangle$  – взаимосвязь между отношениями  $t_k$  и  $t_l$ ,  $R'_i$  – тип связи между этими отношениями (причем  $SN' \subseteq SN''$ ).

Физическая  $FM$  модель БД может быть построена с учетом особенностей СУБД, выбранной согласно требованиям  $dMDB$ , на основании модели  $LM$ .

### 3. Описание алгоритма поддержки обучения проектированию БД

На основании приведенного описания  $DB$ , которое учитывает основные этапы проектирования БД, может быть предложен следующий алгоритм поддержки обучения проектированию БД.

1 этап: Поддержка этапа анализа ПО на основании входных документов  $Doc_k(W, Wd)$ . В ходе анализа студенту может быть рекомендовано обратить внимание на некоторые ключевые слова  $Wk \subset W$ , которые потенциально могут описывать сущности ПО и их атрибуты. Кандидаты в ключевые слова  $W_i \in Wk$  выбираются среди слов, которые не являются стоп-словами, т.е. не представляют ценности при данном виде обработки: предлоги, союзы и т.п. [4]. Далее проводится расчет частоты встречаемости  $tf(W_i, Doc_k)$  в документе  $Doc_k(W, Wd)$  ключевых слов  $W_i \in Wk$ . С учетом  $tf(W_i, Doc_k)$  слово может быть отнесено к:

– предварительному множеству сущностей  $E^* = \{W_i\}$ , если оно существительное и  $tf(W_i, Doc_k) \geq tfe_{\min}$ ;

– предварительному множеству атрибутов  $A^* = \{W_i\}$ , если оно существительное и  $tfe_{\min} \geq tf(W_i, Doc_k) \geq tfa_{\min}$ .

2-й этап: поддержка на этапе КМ заключается в предоставлении дополнительной информации на базе результатов анализа ПО или ранее определенных составляющих КМ:

– во время описания функциональной структуры ИС  $FS$  может быть предложен предварительный список сущностей  $E^*$  для выбора из него

множества акторов  $Act = \{Act_i\}_{i=1,n}$  и построения use-case диаграммы;

– во время построения схема взаимосвязи  $SN = \{E, A, RE\}$  для формирования множества сущностей  $E = \{e_j\}$  могут быть предложены слова  $W_i \in E^*$  из предварительного списка сущностей  $E^*$  ( $W_i = e_i \in E$ ); для формирования множества атрибутов  $A = \{a_{ij}\}$  могут быть предложены слова из предварительного множества атрибутов  $W_j \in A^*$ . Для определения принадлежности существительного к множеству атрибутов для предложений из текста исходных документов строятся синтаксические деревья и определяются взаимосвязи  $RE(e_i, W_j)$  возможного атрибута  $W_j$  с сущностями  $e_i \in E$ , которые встречаются в соответствующих предложениях. Если выявлено слово-связь  $RE(e_i, W_j)$ , которое принадлежит множеству глаголов  $Wv$ , слово  $W_j$  может быть предложено в качестве атрибута сущности  $e_i(a_j)$   $W_j = a_j \in A$ ;

– во время описания документооборота системы  $DM = \{Doc_i(E, A)\}$  разработчику может быть предложено множество атрибутов  $A$  сущностей  $E$ , на основании которых он может сформулировать содержимое выходного документа;

– во время описания алгоритмических зависимостей  $AR = \{AR_i(V, E, A)\}$  разработчику может быть предложено множество атрибутов  $A$  сущностей  $E$ , на основании которых вычисляются вычисляемые атрибуты  $V$ ;

– во время описания информационных потребностей  $ID = \{ID_i\}_{i=1,n}$  пользователей для каждого пользователя из множества акторов  $Act_i$  разработчику может быть предложено множество атрибутов  $A$  сущностей  $E$ , что позволит описать потребности в поиске  $Sh_i = \{Sh_i^j(E, A)\}$ , сортировке  $St_i = \{St_i^k(E, A)\}$ , фильтрации  $Fr_i = \{Fr_i^p(E, A)\}$  и получении статистики  $Stat_i = \{Stat_i^k(E, A)\}$ ; потребности в проведении автоматизации  $Auto_i = \{Auto_m^i(E, A)\}$ ;

– на базе описанных выше составляющих КМ может быть предложена помощь в формулировании набора требований к созданию ИС  $SR = \{dV, dSh, dSt, dFr, dStat, sAuto, dDM, dAR, dMDB, dTR\}$ .

3-й этап: поддержка на этапе построения ER-модели  $ER = \{E', A', SN'\}$  заключается в предоставлении дополнительной информации с этапа КМ, а именно: множество сущностей  $E' = \{e'_i(A')\}$  может быть сформировано на базе сущностей КМ  $E \subset E'$ ; множество атрибутов сущностей  $A' = \{a'_{ij}\}$  – на базе атрибутов КМ  $A \subset A'$ ; схема взаимосвязи  $SN' = \{RE'_{kl}\}$  сущностей – на базе схемы взаимосвязи  $SN \subset SN'$ .

4-й этап: поддержка на этапе построения логической модели  $LM = \{T, A'', SN''\}$  заключается

в предоставлении дополнительной информации с этапа ER-моделирования, а именно: множество реляционных отношений  $T = \{t_i(A'')\}$  может быть сформировано на базе сущностей ER-модели  $E' \subseteq T$ ; множество атрибутов  $A'' = \{a''_{ij}\}$  – на базе атрибутов ER-модели  $A' \subseteq A''$ ; множество связей  $SN'' = \{RT_{kl}\}$  между отношениями – на базе взаимосвязей из ER-модели  $SN' \subseteq SN''$ .

#### 4. Описание обучающего веб-приложения

На основании предложенной мат. модели и алгоритма разработано обучающее веб-приложение, которое обеспечивает поддержку начинающему разработчику на основных этапах проектирования БД, а именно:

– поддерживает работу с исходными документами на этапе анализа ПО разработки;

– поддерживает структуризацию и пошаговое прохождение этапа концептуального моделирования, обеспечивая связь этого этапа с этапом анализа;

– поддерживает прохождение этапа ER-моделирования (без проведения нормализации модели), обеспечивая связь этого этапа с этапом концептуального моделирования;

– поддерживает прохождение этапа логического моделирования (без проведения нормализации), обеспечивая связь этого этапа с этапом ER-моделирования;

– поддерживает формирование проектной документации в виде:

а) описания основных составляющих КМ, которые могут выступить в качестве основы для пояснительной записки по курсовому проектированию по дисциплине «Базы данных»;

б) постановки задачи на разработку ИС в виде функциональных и нефункциональных требований к разрабатываемой информационной системе;

в) схем и диаграмм с этапов, концептуального, ER- и логического моделирования.

Созданное средство решает проблему интерактивного обучения «бумажным» этапам проектирования, а именно анализу и концептуальному моделированию БД. Оно делает работу визуально наглядной и быстрой, что также увеличивает интерес к обучению вопросам проектирования баз данных.

Система представляет собой разделенное веб-приложение и работает во всех современных браузерах на всех платформах.

В качестве серверной части выступает RESTful API, написанное с помощью фреймворка Spring Boot, в качестве СУБД используется MariaDB. В качестве объектного интерфейса к базе данных используется Hibernate. Миграции базы данных реализованы с помощью библиотеки Flyway. В сборке проекта и менеджменте зависимостей серверной части задействован Maven.

Клиентская часть представляет собой одностраничное динамическое веб-приложение, написанное на React JS. Манипуляции клиентским состоянием выполнены по архитектуре Flux, с помощью конкретной его реализации — Redux. Обработка многоэтапных или асинхронных операций на клиентской части выполняются согласно паттерну Saga с использованием библиотеки Redux Saga. Общение между клиентом и сервером осуществляется с помощью JSON AJAX сообщений.

### Выводы

В работе было предложено математическое описание процесса проектирования БД как совокупности взаимосвязанных этапов, начиная с традиционно бумажных этапов анализа и концептуального моделирования. Основой для описания составляющих на основных этапах проектирования выступают понятия сущности и атрибута, что позволяет промоделировать некоторые достаточно творческие моменты проектирования БД. На основании предложенного математического описания разработан алгоритм, который обеспечивает информационную и методологическую поддержку обучаемого в процессе проектирования БД. Разработанная модель и алгоритм положены в

основу обучающего веб-приложения, которое может быть использовано для получения практических навыков проектирования БД, в том числе для поддержки выполнения курсового проекта в рамках дисциплины «Базы данных». Разработанное приложение внедрено в учебный процесс для направления подготовки 121- Программная инженерия ХНУРЭ для уровня «бакалавр» в рамках дисциплины «Базы данных».

### Список литературы:

1. *Дуго С.М.* Базы данных: проектирование и использование: Учебник. - М.: Финансы и статистика, 2005. - 592 с: ил.;
2. Arash Termehchy Cost-Effective Conceptual Design for Information Extraction / Arash Termehchy, Ali Vakilian, Yodsawalai Chodpathumwan, Marianne Winslett. - ACM Transactions on Database Systems, 2015, Volume 40, p. 12:1-12:39;
3. *Кобзарева Т. Ю.* В поисках синтаксической структуры: автоматический анализ русского предложения с опорой на сегментацию / Т. Ю. Кобзарева — М.: РГГУ, 2015. - 371 с.;
4. *Я. О. Вакуленко.* Застосування методів аналізу текстів для підтримки концептуального моделювання баз даних/ Вакуленко Я. О., Мазурова О. О. — Системи обробки інформації. Збірник наукових праць, 2017, випуск 1 (147), с. 127-13.

*Поступила в редколлегию 20.06.2017*

УДК 004.05

**К. Г. Онищенко<sup>1</sup>, І. В. Афанасьєва<sup>2</sup>, І.І. Арсеній<sup>3</sup>**<sup>1,2</sup> ХНУРЕ, м. Харків, Україна, kostiantyn.onyshchenko@nure.ua<sup>3</sup> Інститут загальної та невідкладної хірургії, м. Харків, Україна

## **РОЗРОБКА СЕРВІСУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ ПРИЛАДАМИ ТА ПРИСТРОЯМИ РОЗУМНОГО ДОМУ «SMARTHOUSE» ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІОТ РІШЕНЬ**

Статтю присвячено проектуванню та реалізації сервісу керування пристроями розумного дому. Поетапно змодельована та спроектована архітектура програмної системи. Поетапно проаналізовано та узагальнено результати розробки, створено повноцінну робочу програмну систему. Відображені основні переваги спроектованої архітектури програмного забезпечення та прийнятих програмних рішень при розробці системи розумного дому з використанням ІоТ-рішень. Наведено прийняті архітектурні рішення та приклади роботи.

ІОТ (ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ), РОЗУМНИЙ ДІМ, ДИСТАНЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ ПРИЛАДАМИ

### **Вступ**

Ми живемо у часи невинного розвитку та широкіх можливостей, коли щодня з'являються все нові й нові винаходи. Людина створює та вдосконалює їх задля покращення умов життя. Як наслідок, більшість сфер життя змушена переходити на новий рівень – рівень інформаційних технологій, щоб не зникнути як застаріла. Зараз майже все можна зникнути чи дізнатися за допомогою мережі Інтернет.

Дедалі більшої популярності набувають веб-системи. Такі системи мають певні переваги, а саме: доступність за допомогою мережі Internet, швидкість розповсюдження, менші вимоги до пам'яті комп'ютерів та іншої техніки, і т.д. Для даної роботи ці переваги мають ключове значення, тому була обрана саме веб-система.

З плином часу змінилися цінності та пріоритети людства: люди мандрують через весь світ, жінки працюють на рівних з чоловіками, і т.д. Тому дуже часто трапляється, що досить тривалий час дома ніхто не знаходиться, але за помешканням потрібен догляд. Це проявляється у елементарному: потрібно провітрювати приміщення, контролювати температурний режим, запускати прання, регулювати освітлення, тощо.

Вирішити ці питання покликані розумні прилади, що працюють за допомогою технології Internet of Things [1]. Це постійні інновації та велика кількість різноманітних проектів, які додають інтелекту і функціоналу різним пристроям. Досвід, накопичений розробниками ІоТ-індустрії за весь час її існування, дозволяє виділити загальні складові при створенні програмного продукту.

ІоТ-технологія здатна контролювати стан приладів та керувати ними за допомогою мережі інтернет [1]. Своєчасне повідомлення про стан приладів не тільки полегшує умови проживання, а й запобігає шкоді майну та мешканцям будинку. Усе разом це полегшує життя сучасної людини та робить його більш комфортним.

Отже, метою роботи є проектування, розробка сервісу для забезпечення дистанційного керування

приладами та пристроями розумного дому із використанням ІоТ рішень, рекомендацій та бібліотек ASP.NET MVC, Entity Framework та Java. Окремо слід спроектувати емулятор роботи розумних пристроїв [2]. Система має передбачати певну звітність результатів роботи розумних приладів, зручний і зрозумілий інтерфейс з нативними підказками для недосвідчених користувачів.

### **1. Постановка задачі**

Необхідно спроектувати та реалізувати веб-сервіс для забезпечення дистанційного керування приладами та пристроями розумного дому із використанням ІоТ рішень.

Основне завдання проекту – вирішити проблему великої кількості сервісів для керування розумними приладами, що покривають різні сфери побуту.

Одна з головних ідей при розробці такої системи полягає у використанні структурованої методології при розробці сервісу розумного дому з використанням ІоТ-рішень. Така система повинна поєднувати у собі всі переваги та виключати недоліки вже існуючих систем за рахунок слідування формалізованим правилам, що чітко описують послідовність розробки програмного забезпечення з використанням ІоТ-рішень.

Створення єдиного веб-додатку повинно забезпечити надійне централізоване керування усіма розумними приладами, об'єднавши їх у систему розумного дому.

Інтерфейс програмної системи повинен мати сучасний дизайн, бути виконаним в одному кольоровому рішенні та мати інтуїтивно-зрозумілу систему навігації, керування та відстеження для користувача.

Емулятор приладу розумного дому повинен бути реалізований у консольному вигляді та відображати дані у режимі реального часу.

Основним джерелом доходів даного сервісу повинні бути сфери продажу та підтримки користувачів. Відсутність рекламного навантаження та постійна технологічна підтримка повинні привабити людей, що дорожать своїм часом.



## 2. Аналіз предметної галузі

Галузь інформаційних технологій сьогодення – керування розумними пристроями, використовуючи IoT-технологію. Вона, як найбільш ефективний спосіб обміну даними, здобуває все більшу і більшу популярність серед провідних виробників розумних пристроїв.

Інтернет речей (Internet of Things – IoT) – це концепція обчислювальної мережі фізичних предметів, оснащених вбудованими технологіями для взаємодії один з одним або з зовнішнім середовищем. Вона виключає з частини дій необхідність участі людини [2].

За своєю природою, розробка для IoT – це постійні інновації та велика кількість різноманітних проектів, які використовують штучний інтелект та функції різних пристроїв. Основною концепцією IoT є можливість підключення різних об'єктів (речей), які людина може використовувати в повсякденному житті, наприклад, холодильник, кондиціонер, автомобіль, велосипед і навіть кросівки. Всі ці об'єкти (речі) повинні бути оснащені вбудованими сенсорами, які мають можливість обробляти інформацію, що надходить з навколишнього середовища, обмінюватися нею і виконувати різні дії в залежності від отриманої інформації [3]. Прикладом впровадження такої концепції є система «розумний будинок» або «розумна ферма». Ця система аналізує дані навколишнього середовища і в залежності від показників регулює температуру в приміщенні. У зимовий період регулюється інтенсивність опалення, а в разі спекотної погоди будинок має механізми відкривання і закривання вікон, завдяки чому провітрюється будинок, і все це відбувається без втручання людини.

На сьогоднішній день існує велика кількість різних розумних гаджетів на кшталт розумних годинників, вагів, чайників, пилососів. Інформація про розумні прилади зберігається в основному у локальній базі даних, або на сервісі кожної конкретної організації [3]. Під час використання багатьох приладів одночасно виникають проблеми зі своєчасним відстеженням стану приладів та їх синхронізацією. Це створює певні незручності, що можуть стати поштовхом для відмови людини від користування розумними приладами.

Система керування розумного дому – це система, що дозволяє людям, не залежно від віку та статі, керувати усіма розумними пристроями, що знаходяться в його помешканні.

## 3. Моделювання та проектування програмної системи

Моделювання – це метод дослідження явищ і створення процесів, що ґрунтується на заміні конкретного об'єкта досліджень іншим, подібним до нього (моделлю) [3].

Для моделювання програмної системи використовувалась уніфікована мова UML, яка використовується у парадигмі об'єктно-орієнтованого

програмування та є невід'ємною частиною уніфікованого процесу розробки програмного забезпечення [4]. UML є мовою широкого профілю, це відкритий стандарт, що використовує графічні позначення для створення абстрактної моделі системи, названої UML-моделлю. UML був створений для визначення, візуалізації, проектування й документування в основному програмних систем.

UML може бути застосовано на всіх етапах життєвого циклу аналізу систем і розробки прикладних програм. Різні види діаграм які підтримуються UML, дають можливість представити систему у такому вигляді з якого її можна легко перевести в програмний код об'єктно-орієнтованих мов програмування, що ще більш прискорює процес розробки. Саме тому для найбільш повного уявлення про програмну систему та її принципи дії, були побудовані UML діаграми, котрі дають повний опис системи [4].

Діаграма послідовності (англ. sequence diagram) відображає взаємодії об'єктів впорядкованих за часом. Зокрема, така діаграма відображає задіяні об'єкти та послідовність відправлених повідомлень між ними [4].

Діаграма послідовностей представляє собою систему в цілому та те, як відбувається взаємодія між об'єктами на різних рівнях [4]. Послідовність дій протягом усієї роботи з системою, починаючи від реєстрації нового користувача і закінчуючи зміною стану приладу розумного дому зображено на діаграмі послідовності, рис. 1.

На ній можна побачити, що відбувається в програмній системі. Коли користувач відкриває вікно з даними, відображення надсилає запит до контролера для отримання даних, контролер в свою чергу надсилає запит до моделі, яка отримує дані з бази даних. Ці дані з бази надходять до відображення та пройшовши обробку надаються користувачу. Коли він виконав зміни у стані приладу розумного дому і натиснув на кнопку підтвердження зміни стану, дані через відображення відправляються до контролера, який їх перевіряє та відправляє до моделі. Модель спочатку обробляє дані, а потім зберігає їх до бази. Контролер в свою чергу повертає користувачу сторінку з результатом, або перенаправляє до початкової сторінки. Це загальна схема послідовності роботи будь-якого користувача з системою.

Тобто коли користувач просто відриває сторінку з даними, то контролер запрошує дані у моделі, яка отримує їх з бази та повертає, контролер обробляє дані та повертає дані для відображення.

Після перевірки наданої інформації дані заносяться у базу даних для подальшого використання.

Архітектура програмного забезпечення (англ. software architecture) – спосіб структурування програмної або обчислювальної системи, абстракція елементів системи на певній фазі її роботи. Система може складатись з кількох рівнів абстракції, і мати багато фаз роботи, кожна з яких може мати окрему архітектуру. Правильне проектування архітектури

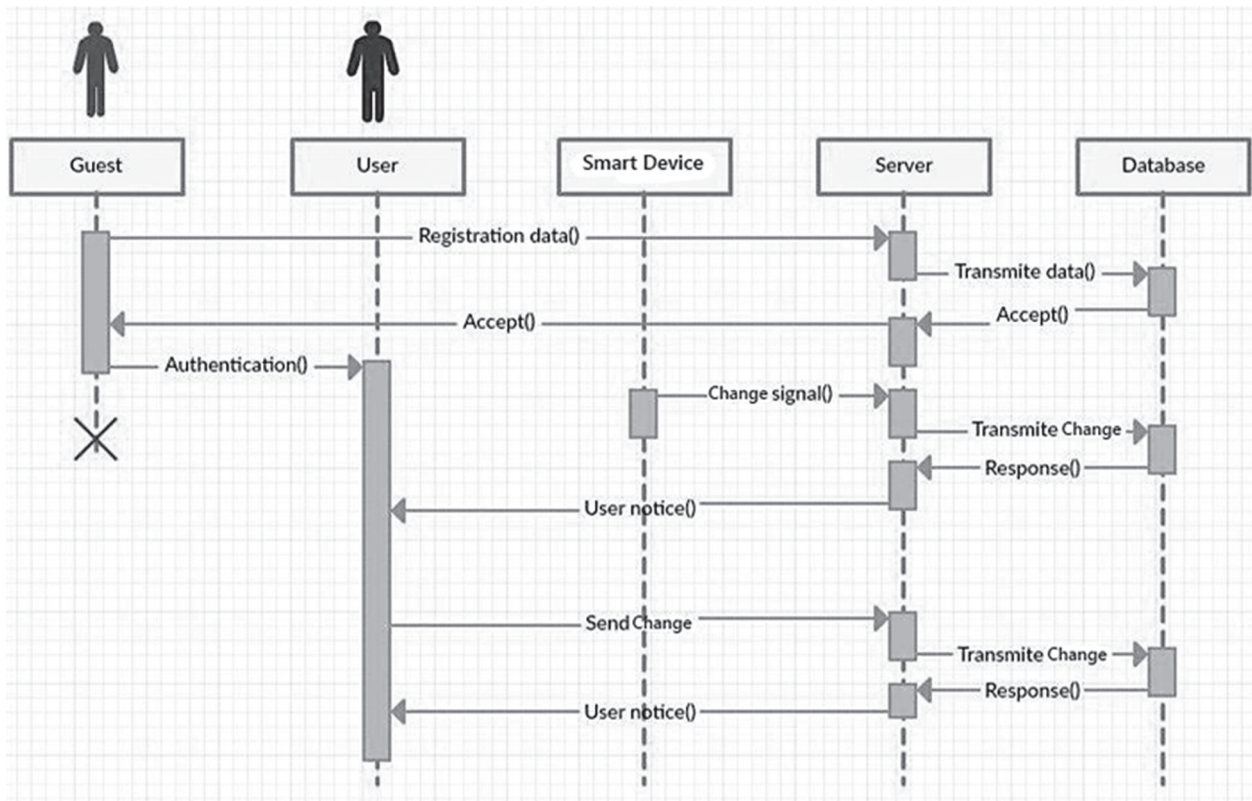


Рис. 1. Діаграма послідовності

програмної системи робить систему зданою до розширення та полегшує її супровід під час подальшого використання.

З огляду на всі переваги і недоліки вже існуючих рішень необхідно використовувати всі переваги об'єктно-орієнтованого підходу в програмуванні для створення гнучкої архітектури програмної системи. Це значно підвищить витрати на ранніх етапах розробки продукту, проте дозволить мінімізувати їх на стадії супроводу готового рішення. Досягнення гнучкості в архітектурі досягається побудовою концептуально правильної діаграми класів використовуючи основні парадигми ООП і SOLID принципи, рис. 2.

Абстрактні класи та інтерфейси дозволяють користувачеві додавати нові елементи розумного будинку шляхом виділення загальних методик і властивостей у вже існуючих (закладених) наборів поведінки, рис. 3.

#### 4. Опис прийнятих програмних рішень

Для реалізації веб-сервісу було вирішено використовувати клієнт-серверну архітектуру. Цей архітектурний підхід є одним із архітектурних шаблонів програмного забезпечення та є домінуючою концепцією у створенні розподілених мережових додатків і передбачає взаємодію та обмін даними між ними [4].

У такій системі сервери є незалежними один від одного. Клієнти також функціонують паралельно і незалежно один від одного. Немає жорсткої прив'язки клієнтів до серверів. Більш ніж типовою є ситуація, коли один сервер одночасно обробляє

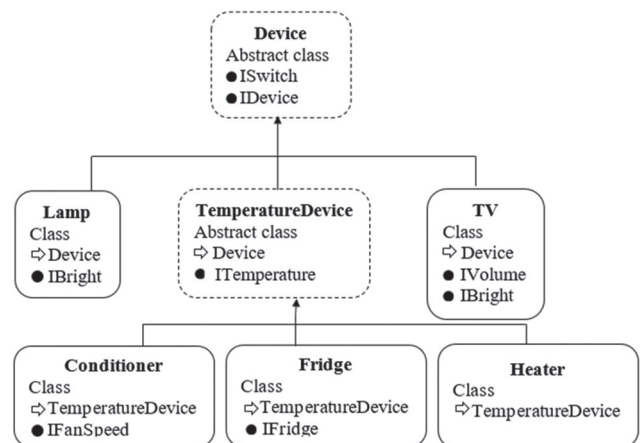


Рис. 2. Діаграма класів

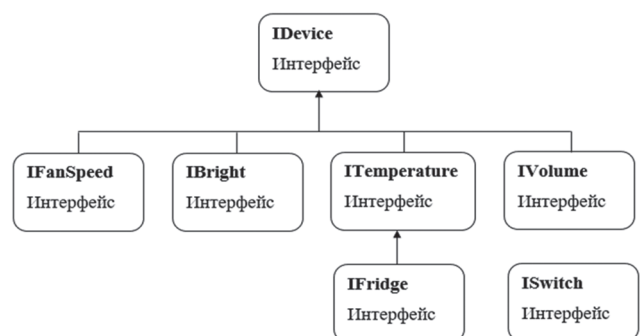


Рис. 3. Реалізація інтерфейсів

запити від різних клієнтів, з другого боку, клієнт може звертатися то до одного сервера, то до іншого. Клієнти мають знати про доступні сервери, але можуть не мати жодного уявлення про існування інших клієнтів.

Для веб-серверу, який реалізує сервіс було обрано технологію ASP.NET MVC. Цю технологію було обрано, тому що вона являється однією з найбільш функціональних та зручних для розробки веб-програм, актуальною і популярною серед розробників. Технологія ASP.NET MVC базується на шаблоні проектування MVC.

Паттерн архітектури Model-View-Controller (MVC) поділяє програму на три основні частини: модель, уявлення і контролер. Розділення це здійснюється як на фізичному так і на логічному рівнях.

Використання MVC шаблону надає можливість будувати впорядковану програмну систему та дозволяє попередити та запобігти плутаниці в програмному коді, котра може виникнути в проектах значного масштабу.

Отриманий інтерфейс програмного продукту є інтерактивним та максимально інформативним. Він відображає користувачу інформацію про наявні прилади та їх стан, рис. 4.

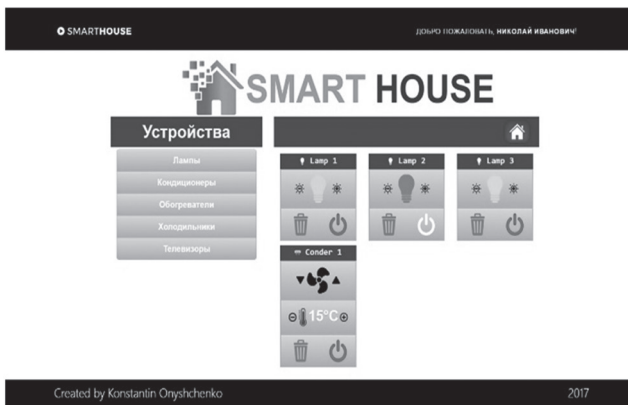


Рис. 4. Головна сторінка користувача

Для взаємодії з БД користувачів було обрано технологію Entity Framework, яка дозволяє розробникам розробляти додатки для доступу до даних, що працюють з концептуальною моделлю програми, а не безпосередньо з реляційною схемою зберігання даних.

Для розробки БД за допомогою Entity Framework було обрано стратегію Code First («спочатку код»). Підхід Code First дозволяє визначити модель з використанням C# класів, яка буде використана для створення схеми бази даних або для зіставлення з існуючою базою даних. Таким чином, використовуючи запити до БД користувачеві надається звіт про роботу приладу розумного дому, рис. 5.

Для зберігання інформації використовується база даних Microsoft SQL Server.

Розроблений емулятор створювався за концепцією IoT (Інтернет речей), рис. 6. Вона полягає у оснащенні фізичних об'єктів (речей) вбудованими технологіями для взаємодії один з одним або зовнішнім середовищем [4]. Організація таких мереж має на меті перебудувати економічні та суспільні процеси, зменшуючи необхідність безпосередньої участі людини.



Рис. 5. Перегляд результатів роботи конкретного пристрою розумного дому

У якості мови програмування була обрана Java через те що програми, написані на ній, транслюється в байт-код, що виконується віртуальною машиною, оброблює її та передає інструкцію обладнанню як інтерпретатор [4]. Перевагою подібного способу виконання програм є повна незалежність байт-коду від операційної системи і устаткування, що дозволяє виконувати Java-додатки на будь-якому пристрої, для якого існує відповідна віртуальна машина. Іншою важливою особливістю технології Java є гнучка система безпеки, в рамках якої виконання програми повністю контролюється віртуальною машиною.

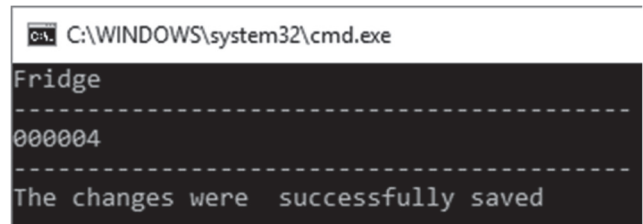


Рис. 6. Робота емулятору пристрою розумного дому

Оскільки, як ідентифікаторів IoT-пристроїв використовуються MAC-адреса мережевого адаптера, особливу увагу було приділено коректній ідентифікації по протоколу IPv6, який забезпечує унікальні адреси мережевого рівня не менше 300 млн. пристроїв на одного мешканця планети.

Для бездротової передачі даних особливо важлива роль в побудові інтернету речей грають такі якості, як ефективність в умовах низьких швидкостей, відмовостійкість, адаптивність, можливість самоорганізація. За досягнення даних цілей відповідає стандарт IEEE 802.15.4 [5].

Серед провідних технологій важливу роль в інтеграції інтернету речей грають рішення PLC – технології побудови мереж передачі даних по лініях електропередач, так як у багатьох додатках присутній доступ до електромереж (наприклад, торгові автомати, банкомати, інтелектуальні лічильники, контролери освітлення спочатку підключені до мережі електропостачання), 6LoWPAN, який реалізує шар IPv6 як над IEEE 802.15.4, так і над PLC, будучи відкритим протоколом, по стандарту IETF, відзначається як особливо важлива для розвитку інтернету речей



### Висновки

Створений сервіс для забезпечення дистанційного керування приладами та пристроями розумного дому дозволяє контролювати стан розумних приладів та впливати на їх роботу шляхом зміни налаштувань у веб додатку в незалежності від місця розташування користувача. Це, без сумнівів, може значно підвищити рівень комфорту проживання у помешканні та зменшити значну кількість часу.

Розроблена система є корисним сервісом для людей, що цінують свій час, націлені на покращення своїх житлових умов та мають жагу до впровадження новітніх технологій у своє повсякденне життя. Без сумнівів, система розумного дому не тільки економить час користувача, а ще й підвищує рівень безпеки його помешкання. Сервіс дозволяє слідкувати за станом датчиків та приладів розумного дому дистанційно, де б не знаходився користувач.

### Список літератури:

1. IOT Documentation [Електронний ресурс] / Intel Software Developer Zone. – Режим доступу: <https://software.intel.com/en-us/articles/iot-path-to-product-how-to-build-the-smart-home-prototype/> 28.04.2017 р. – Загол. з екрану.
2. *Velusami K.* Iinternet of Things in Cloud IDG/ K. Velusamy, D. Venkitaramanan, Sh. K. Vasudevan// *Journal of Engineering and Applied Sciences.* – 2013. – 8(9-12). – P. 304-313.
3. *Онищенко К. Г.* Методология разработки систем умного дома с применением IoT решений / К. Г. Онищенко, И. В. Афанасьєва // *Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: материалы 21-го Междунар. молодежн. форума.* – г. Харьков: ХНУРЭ, 2017. – С. 157-158.
4. *Фаулер М.* UML Основы / М. Фаулер, К. Скотт – СПб: Символ-Плюс, 2002. – 192 с.
5. *Онищенко К. Г.* Структурированная методология разработки сервиса для обеспечения дистанционного управления приборами и устройствами умного дома с использованием Internet of Things решений / К.Г.Онищенко, И. В. Афанасьєва // *ScienceRise.* – 2017. – 5(2). – С. 30-33.

*Надійшла до редколегії 23.06.2017*



## РЕФЕРАТИ

## РЕФЕРАТЫ

## ABSTRACTS

УДК 004.853

**Метод нейромережевої корекції помилок в редагованих електронних текстах.** / Л.Е. Чала, С.Г. Удовенко, С.А. Гриньов // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. – 2017. – № 1 (88). – С. 15–21.

У статті досліджено ефективність застосування нейронних мереж в системах корекції англійських електронних текстів для виявлення граматичних та орфографічних помилок. Запропоновано модифікований метод корекції граматичних помилок з використанням рекурентних нейронних мереж.

Л. 3. Бібліогр.: 11 найм.

УДК 004.853

**Метод нейросетевой коррекции ошибок в редактируемых электронных текстах.** / Л.Э. Чалая, С.Г. Удовенко, С.А. Гринев // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. – 2017. – № 1 (88). – С. 15–21.

В статье исследована эффективность использования нейронных сетей в системах коррекции англоязычных электронных текстов для обнаружения грамматических и орфографических ошибок. Предложен модифицированный метод коррекции грамматических ошибок с использованием рекуррентных нейронных сетей.

Ил. 3. Библиогр.: 11 найм.

UDK 004.853

**Method of network correction of errors in the edited electronic texts** / L.E. Chala, S.G. Udovenko, S.A. Grinyov // Bionics of intelligence: Sci. mag. – 2017. – № 1 (88). – P. 15–21.

The efficiency of neural models usage in english electronic text correction systems for detection of grammatical and morphological errors is examined in article. The modified method of grammar error correction is realised with the use of recurrent neural network.

Fig. 3. Ref.: 11 items.

УДК 519. 85

**Задача балансної компоновки циліндричних об'єктів із урахуванням її комбінаторних особливостей.** / І.В.Гребенник, А.А.Коваленко, Т.Є.Романова, І.А.Урняєва, С.Б. Шеховцов // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. – 2017. – № 1 (88). – С. 22–28.

Розглядається оптимізаційна задача балансної компоновки множини циліндричних об'єктів в контейнері, розділеному круговими стелажми на підконтейнери. Для аналітичного опису умов розміщення циліндрів в підконтейнерах використовується метод  $\phi$ -функцій. Будується математична модель, в якій враховуються комбінаторні особливості задачі, пов'язані з генерацією розбиття множини об'єктів, що розміщуються всередині підконтейнерів, при проектуванні компоновки. Наводяться результати чисельних експериментів для вирішення задачі компоновки циліндрів з метою: мінімізації відхилення центру мас системи від заданої точки; мінімізації радіусу основи циліндричного контейнера з урахуванням рівноваги системи.

Бібліогр.: 11 найм.

УДК 519. 85

**Задача балансной компоновки цилиндрических объектов с учетом ее комбинаторных особенностей.** / И.В.Гребенник, А.А.Коваленко, Т.Е.Романова, И.А.Урняева, С.Б. Шеховцов // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. – 2017. – № 1 (88). – С. 22–28.

Рассматривается оптимизационная задача балансной компоновки множества цилиндрических объектов в контейнере, разделенном круговыми стеллажами на подконтейнеры. Для аналитического описания условий размещения цилиндров в подконтейнерах используется метод  $\phi$ -функций. Строится математическая модель, в которой учитываются комбинаторные особенности задачи, связанные с генерацией разбиения множества объектов, размещаемых внутри подконтейнеров, при проектировании компоновки. Приводятся результаты численных экспериментов для решения задач компоновки цилиндров с целью: минимизации отклонения центра масс системы от заданной точки; минимизации радиуса основания цилиндрического контейнера с учетом равновесия системы.

Библиогр.: 11 найм.

UDK 519. 85

**Balance layout problem of cylindrical objects taken into account its combinatorial features.** / I. V. Grebennik, A.A.Kovalenko, T.E.Romanova, I.A. Urniaieva, S.B. Shekhovtsov // Bionics of intelligence: Sci. mag. – 2017. – № 1 (88). – P. 22–28.

The paper considers an optimization layout problem for a given collection of cylindrical objects in a container divided by circular racks onto subcontainers. For analytical description of non-overlapping and containment constraints the  $\phi$ -function technique is used. We provide mathematical model of the problem that takes into account the combinatorial features of the problem, associated with the generation of partitions of the set of objects placed inside the subcontainers when designing the layout. The computational results are provided for the layout problem in order to: minimize the deviation of the center of mass of the system from a given point; minimize the radius of the base of the cylindrical container, taking into account the equilibrium of the system.

Ref.: 11 items

УДК 519.85

**Про дві задачі оптимальної упаковки еліпсоїдів** / О.М. Хлуд, Т.Є. Романова, П.І. Стецюк // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 29–35.

Розглядається задача упаковки гомотетичних однаково орієнтованих еліпсоїдів в контейнері мінімально об'єму. У якості контейнера обирається прямокутний паралелепіпед або еліпсоїд. Будуються дві математичні моделі у вигляді задач нелінійного програмування та пропонуються ефективні алгоритми розв'язання. В основі першого — лежить  $r$ -алгоритм Шора, а другий алгоритм використовує гомотетичні перетворення еліпсоїдів і оптимізаційну процедуру, яка дозволяє скоротити обчислювальні ресурси. Наводяться результати чисельних експериментів.

Іл. 03. Бібліогр.: 11 найм.

УДК 519.85

**О двух задачах оптимальной упаковки гомотетических эллипсоидов** / О.М. Хлуд, Т.Е. Романова, П.И. Стецюк // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 29–35.

Рассматриваются две задачи упаковки гомотетичных одинаково ориентированных эллипсоидов: в прямоугольном параллелепипеде минимального объема и в эллипсоиде с минимальным коэффициентом гомотетии. Строятся математические модели в виде задач нелинейного программирования. Предлагается два подхода к поиску эффективных локально оптимальных решений. Первый подход основан на  $r$ -алгоритме Шора. Второй подход использует гомотетические преобразования эллипсоидов, и оптимизационную процедуру, позволяющую свести задачу с большим числом неравенств к последовательности задач с меньшим числом неравенств. Предлагается алгоритм доупаковки. Приводятся результаты численных экспериментов.

Ил. 03. Библиогр.: 11 наим.

UDC 519.85

**On two problems of optimal packing an ellipsoids** / T.E. Romanova, P.I. Stetsuk, O.M. Khlud // Bionics of intelligence: Sci. mag. — 2017. — № 1 (88). — P. 29–35.

The paper studies two packing problems of the same oriented homothetic ellipsoids into a container of minimal volume. The container can be a rectangular parallelepiped or an ellipsoid. We formulate the problems in the form of nonlinear programming problems and propose two solution algorithms. First algorithm is based on Shor's  $r$ -algorithm. The second algorithm employs a homothetic transformation of ellipsoids and special optimization procedure, which allows us to reduce considerably computational costs. Some computational results are provided.

Fig. 03. Ref.: 11 items.

УДК 519.161

**Перетворення у наближених алгоритмах рішення симетричної задачі комівояжера (СЗК)** / А.В. Панишев, В.Л. Левківський, Г.В. Марчук // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 36–40.

В статті розглянуто алгоритм знаходження гамільтонового циклу по  $i$ -дереву  $T = (V, E_i)$  повного графа  $H_n = (V, E_n)$  симетричної задачі комівояжера з оцінкою вартості отриманого рішення.

Іл. 7. Бібліогр.: 2 найм.

УДК 519.161

**Преобразование в приближенных алгоритмах решения симметричной задачи коммивояжера (СЗК)** / А.В. Панишев, В.Л. Левковский, Г.В. Марчук // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 36–40.

В статье рассмотрен алгоритм нахождения гамильтонова цикла по  $i$ -дереву  $T = (V, E_i)$  полного графа  $H_n = (V, E_n)$  симметричной задачи коммивояжера с оценкой стоимости полученного решения.

Ил. 7. Библиогр.: 2 наим.

UDK 519.161

**Transformations in approximation algorithms for solving the symmetric travelling salesman problem (TSP)** / A.V. Panishev, V.L. Levkivsky, G.V. Marchuk // Bionics of intelligence: Sci. mag. — 2017. — № 1 (88). — P. 36–40.

The algorithm for finding the Hamiltonian cycle in  $i$ -tree  $T = (V, E_i)$  of the complete graph  $H_n = (V, E_n)$  of the symmetric travelling salesman problem with an estimate of the cost of the obtained solution is considered in this article.

Fig. 7. Ref.: 2 items.

УДК 004.05

**Критерій вибору структури інформаційної системи закладів Служби крові** / Д.К. Міхнов, А.В. Міхнова, К.С. Чиркова, А.В. Чинілін // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 41–44.

Запропоновано критерій вибору організаційно-технічної структури спеціалізованої медичної інформаційної системи закладів Служби крові. Критерій оснований на функціонально-вартісному підході. Застосування критерію доцільно для оцінювання організаційно-технічної структури системи при впровадженні нової або модернізації існуючої.

Табл. 1. Бібліогр.: 9 найм.

УДК 004.05

**Критерий выбора структуры информационной системы учреждений Службы крови / Д.К. Михнов, А.В. Михнова, К.С. Чиркова, А.В. Чинилин // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 41–44.**

Предложен критерий выбора организационно-технической структуры специализированной медицинской информационной системы учреждений Службы крови. Критерий основан на функционально-стоимостном подходе. Применение критерия целесообразно для оценивания организационно-технической структуры системы при внедрении новой или модернизации существующей.

Табл. 1. Библиогр.: 9 наим.

UDC 004.05

**Criterion for choosing the structure of the information system of institutions of the Blood Service / D.K. Mikhnov, A.V. Mikhnova, K.S.Chirkova, A.V. Chinilyn // Bionics of intelligence: Sci. mag. — 2017. — № 1 (88). — P. 41–44.**

A criteria for the selection of the organizational and technical structure of the specialized medical information system of the Blood Service is proposed. The criterion is based on the functional-value approach. The application of the criterion is useful for assessing the organizational and technical structure of the system when introducing a new or upgrading an existing one.

Table. 1. Ref.: 9 nim.

УДК 519.62

**Мультиалгебраїчні дискретні системи при наявності алгебраїчної структури носія. Повідомлення 3 / Каграманян А.Г., Четвериков Г.Г., Шляхов В.В. // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 45–49.**

Розглянуто обмеження, при яких шукаються умови існування лінійних предикатів в гільбертовому просторі. Показано, що останні можуть мати різний характер. Знайдено умови існування лінійних предикатів, що задовольняють даному обмеженню. Доведено, що вони є необхідними і достатніми. При цьому позитивний конус — це один з видів обмежень так як часто інтенсивність вхідних сигналів реально обмежена зверху (наприклад, яскравість випромінювання).

Табл. 1. Л. 7. Бібліогр. : 4 найм.

УДК 519.62

**Мультиалгебраические дискретные системы при наличии алгебраической структуры носителя. Сообщение 3 / Каграманян А.Г., Четвериков Г.Г., Шляхов В.В. // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 45–49.**

Рассмотрены ограничения, при которых ищутся условия существования линейных предикатов в гильбертовом пространстве. Показано, что последние могут носить различный характер. Найдены условия существования линейных предикатов, удовлетворяющие данному ограничению. Доказано, что они являются необходимыми и достаточными. При этом положительный конус — это один из видов ограничений так как часто интенсивность входных сигналов реально ограничена сверху (например, яркость излучения).

Табл. 1. Л. 7. Бібліогр. : 4 найм.

UDC 519.62

**Multialgebraic discret systems in the presence of an algebraic structure of the support. Report3 / A.G. Kagramanyan, G.G. Chetverikov, V.V. Shlyahov // Bionics of intelligence: Sci. mag. — 2017. — № 1 (88). — P. 45–49.**

Considered restrictions under which conditions for the existence of linear predicates in a Hilbert space are sought. It is shown that the latter can have a various nature. Conditions for the existence of linear predicates that satisfy this constraint are found. It is proved that they are necessary and sufficient. In this case, the positive cone is one of the types of constraints since often the intensity of the input signals is really limited from above (for example, the brightness of the radiation).

Fig. 7. Ref.: 2 items.

УДК 519.6

**Чисельне розв'язання бігармонічної задачі для випуклого багатокутника за допомогою сплайнів п'ятого степеня на трикутній сітці вузлів / О.М Литвин, І.С. Томанова // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 50–54.**

Сплайни мають численні застосування: як в математичній теорії, так і в різноманітних галузях науки і техніки. В силу високої обчислювальної складності, на практиці часто використовуються сплайни низьких степенів. У даній роботі на основі явних формул для сплайнів п'ятого степеня був запропонований алгоритм побудови розв'язку бігармонічної задачі для жорстко защемленої опуклої багатокутної пластини.

Табл. 1. Л. 7. Бібліогр. : 4 найм.

УДК 519.6

**Численное решение бигармонической задачи для выпуклого многоугольника с помощью сплайнов пятой степени на треугольной сетке узлов / О.Н Литвин, И.С. Томанова // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 50–54.**

Сплайны имеют многочисленные применения: как в математической теории, так и в разнообразных областях науки и техники. В силу высокой вычислительной сложности, на практике зачастую используются сплайны низких степеней. В данной работе на основе явных формул для сплайнов пятой степени был предложен алгоритм построения решения бигармонической задачи для жестко защемленной выпуклой многоугольной пластины.

Табл. 1. Ил. 7. Библиогр.: 4 найм.

UDC 519.6

**Numerical solution biharmonic problem for convex polygon via splines fifth degree on a triangular grid units / O.M. Lytvyn, I.S. Tomanova // Bionics of intelligence: Sci. mag. – 2017. – № 1 (88). – P. 50–54.**

Splines have numerous applications: both in mathematical theory and in various fields of science and technology. Due to the high computational complexity, in practice, splines of low degrees are often used. In this paper, based on explicit formulas for splines of the fifth degree, an algorithm for constructing a solution of the biharmonic problem for a rigidly clamped convex polygonal plate was proposed.

Tabl. 1. Fig. 7. Ref.: 4 items.

УДК 519.853:005

**Оптимальні по Парето рішення багатокрітеріальної оптимізації завдань управління виробництвом і логістики / Г. Г. Асеев // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. – 2017. – № 1 (88). – С. 55–59.**

Розглядається завдання багатокрітеріальної оптимізації управління виробництвом і ланцюгом поставок у логістиці. Запропоновані методи знаходження мінімуму при оптимізації приводять до безлічі оптимальних по Парето рішень.

Бібліограф.: 5 найм.

УДК 519.853:005

**Оптимальные по Парето решения многокритериальной оптимизации задач управления производством и логистики / Г. Г. Асеев // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. – 2017. – № 1 (88). – С. 55–59.**

Рассматривается задача многокритериальной оптимизации управления производством и цепям поставок в логистике. Вопросы оптимизации решений в логистике, с учетом совместного решения задач многокритериальной оптимизации производством (управление издержками, прибылью, минимальных расходах энергоресурсов, сырья и т. д.), не рассматривались. В центре методологии оптимизации решений в логистике находится операция количественного / качественного сравнения альтернатив для выбора одной, подлежащей реализации. Поэтому, используемые в рамках такого анализа оценки являются многопараметрическими, чтобы более полно отображать основные свойства альтернатив, включая конечный экономический результат, стоимость, издержек, эффективность, риск, цепи поставок и т.д.

Оттого в формате задач выбора наилучших решений для систем логистики, сегодня требуется учитывать требования многокритериальности рассматриваемых задач оптимизации управления производством. С этих позиций поставленная задача является актуальной.

Предложенные в статье методы нахождения минимума при оптимизации приводят к множеству оптимальных по Парето решений и хорошо зарекомендовали себя на практике.

Библиограф.: 5 найм.

UDC 519.853:005

**Optimal Pareto solutions for multicriterial optimization of production management and logistics problems / G. G. Aseyev // Bionics of intelligence: Sci. mag. – 2017. – № 1 (88). – P. 55–59.**

The problem of multicriteria optimization of production management and supply chains in logistics is considered. The proposed methods for finding the minimum for optimization lead to a set of Pareto optimal solutions.

Ref.: 5 items.

УДК 517.95 : 517.988

**Застосування методів нелінійного аналізу в математичному моделюванні мікроелектромеханічних систем / О.С. Кончаковська, М.В. Сидоров // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. – 2017. – № 1 (88). – С. 60–64.**

Розглянуто нелінійну крайову задачу, яка є математичною моделлю найпростішої електростатичної мікроелектромеханічної системи. Чисельний аналіз задачі проведено за допомогою методу двобічних послідовних наближень. Отримано наближений розв'язок задачі та чисельно досліджено залежність норми розв'язку від параметра, що входить у праву частину рівняння. Всі обчислювальні експерименти було проведено для областей двох видів: кола та квадрата. Проведено порівняльний аналіз отриманих результатів.

Табл. 4. Іл. 8. Бібліогр.: 9 найм.

УДК 517.95 : 517.988

**Применение методов нелинейного анализа в математическом моделировании микроэлектромеханических систем / О.С. Кончаковская, М.В. Сидоров // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. – 2017. – № 1 (88). – С. 60–64.**

Рассмотрена нелинейная краевая задача, которая является математической моделью простейшей электростатической микроэлектромеханической системы. Численный анализ задачи проведен с помощью метода двусторонних последовательных приближений. Получено приближенное решение задачи и численно исследовано зависимость нормы решения от параметра, входящего в правую часть уравнения. Все вычислительные эксперименты были проведены для областей двух видов: круга и квадрата. Проведен сравнительный анализ полученных результатов.

Табл. 4. Ил. 8. Библиогр.: 9 найм.



UDC 517.95 : 517.988

**Mathematical modeling of microelectromechanical systems using methods of nonlinear analysis** / O.S. Konchakovska, M.V. Sidorov // *Bionics of intelligence: Sci. mag.* – 2017. – № 1 (88). – P. 60–64.

Nonlinear boundary value problem which is a mathematical model of a simple electrostatic microelectromechanical system, is considered. For numerical analysis of problem we used the method of two-sided successive approximations. Approximate solution of problem is obtained and numerically investigated dependence the norm of solution by the parameter included in the right-hand side of the equation. Computational experiments were conducted for two types of areas: circle and square. Comparative analysis of the received results is conducted.

Tab. 4. Fig. 8. Ref.: 9 items.

УДК 519.234.7

**Оцінювання параметра розподілу Юла** // В.Л. Шергін, Е.Е.Дережа, В.С.Передерій, М.Р.Політ // *Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал.* – 2017. – № 1 (88). – С. 65–68.

Аналізуються методи оцінювання параметру розподілу Юла-Саймона. Досліджено вплив апроксимації розподілу Юла степеневим на точність оцінок. Проведено чисельне моделювання оцінювання параметру на прикладі мережі Барабаші-Альберт, яке підтвердило незміщеність оцінки, яка ґрунтується на використанні ряду відношень звичайної функції ймовірностей до кумулятивної.

Іл. 2, Табл.:1, Бібліогр.:7 найм.

УДК 519.234.7

**Оценивание параметра распределения Юла** // В.Л. Шергин, Э.Э. Дереза, В.С. Передерий, М.Р. Полиит // *Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал.* – 2017. – № 1 (88). – С. 65–68.

Анализируются методы оценивания параметра распределения Юла-Саймона. Исследовано влияние аппроксимации распределения Юла степенным на точность оценок. Проведено численное моделирование оценивания параметра на примере сети Барабаша-Альберт, которое подтвердило несмещённость оценки, основанной на использовании ряда отношений обычной функции вероятности к кумулятивной.

Ил. 2, Табл.:1, Библиогр.:7 найм.

UDK 519.234.7

**Yule distribution parameter estimation** // V.L. Shergin, E.E. Dereza, V.S. Perederiy, M.R. Poliit // *Bionics of intelligence: Sci. mag.* – 2017. – № 1 (88). – P. 65–68.

Methods of estimation the Yule-Simon distribution parameter are analyzed. The effect of the approximation the Yule-Simon distribution by the power law on the accuracy of estimates is studied. A numerical simulation based on the model of the BA model were performed. It was shown that estimate based on pmf/ccdf ratio is unbiased.

Fig. 2, Tab.:1, Ref.:7 items.

УДК 519.87:622.233

**Математичне моделювання режимних параметрів буріння вибухових свердловин в гірських масивах** / А.І. Повзун // *Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал.* – 2017. – № 1 (88). – С. 69–74.

У статті наведено результати досліджень технологічних параметрів буріння вибухових свердловин діаметром 215,9 мм у вапняку міцністю 8 за шкалою М.М. Протод'яконова одношарошечним долотом з вертикальною цапфою і трешарошечним долотом. Застосування одношарошечного долота підвищує швидкість буріння і суттєво знижує рівень вібрацій на патроні обертача бурового верстата.

Табл. 3. Іл. 5. Бібліогр.: 5 найм.

УДК 519.87:622.233

**Математическое моделирование режимных параметров бурения взрывных скважин в горных массивах** / А.И. Повзун // *Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал.* – 2017. – № 1 (88). – С. 69–74.

В статье приведены результаты исследований технологических параметров бурения взрывных скважин диаметром 215,9 мм в известняке прочностью 8 по шкале М.М. Протодьяконова одношарошечным долотом с вертикальной цапфой и трехшарошечным долотом. Применение одношарошечного долота повышает скорость бурения и существенно снижает уровень вибраций на патроне вращателя бурового станка.

Табл. 3. Ил. 5. Библиогр.: 5 найм.

UDC 519.87:622.233

**Mathematical modeling of regime parameters of blasting holes drilling in mountain ranges** / A.I. Povzun // *Bionics of intelligence: Sci. mag.* – 2017. – № 1 (88). – P. 69–74.

Some results of comparative tests of the one-cutter drillingbits with vertical and sloping pins are given in the article. It also gives the results of the three-cutter drilling bit test while drilling a blasthole which is 215,9 mm in diameter for blasting work by rock-rilling machine 2СБШ-200. In the process of drilling the speed and power capacity needed for the blasthole drilling and the level of vibrations on the cartridge of the boring head were measured. It was concluded that the use of the one-cutter drilling bit with a vertical pin conducted the drilling speed increase, power consumption decrease and a considerable drop of the vibration level on the cartridge of the boring head.

Tab. 5. Fig. 5. Ref.: 5 items.

УДК 004.932:504

**Комп'ютерний аналіз просторових зображень з використанням марковських моделей.** / О.Б Дудінова, С.Г. Удовенко // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 75–79.

У статті розглянуто метод сегментації та виділення контурів просторових цифрових зображень, оснований на використанні марковських моделей. Результати тестування підтверджують ефективність застосування методу для комп'ютерного аналізу просторово — розподілених даних в геоінформаційних системах.

Л. 3. Бібліогр.: 7 найм.

УДК 004.932:504

**Компьютерный анализ пространственных изображений с использованием марковских моделей.** / О.Б Дудінова, С.Г. Удовенко // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 75–79.

В статье рассмотрен метод сегментации и выделения контуров пространственных цифровых изображений, основанный на использовании марковских моделей. Результаты тестирования подтверждают эффективность использования метода для компьютерного анализа пространственно - распределенных данных в геоинформационных системах.

Л. 3. Библиогр.: 7 найм.

UDK 004.932:504

**Computer analysis of spatial images with the use of Markov models.** / O.B. Dudinova, S.G. Udovenko // Bionics of intelligence: Sci. mag. — 2017. — № 1 (88). — P. 75–79.

The method of segmentation of spatial digital data, based on the application of Markov models, is considered in article. Testing results confirm efficiency of application of method for computer analysis of spatial data in the geographic information systems.

Fig. 3. Ref.: 7 items.

УДК 004.891.3

**Принцип та метод еволюційної побудови бази знань на основі аналізу логів ІС процесного управління** / О.В. Чала // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 80–84.

Розглянуто проблему виявлення та формалізації знань в інформаційній системі процесного управління. Запропоновано принцип еволюційної побудови бази знань на основі аналізу логів інформаційної системи. У відповідності до даного принципу, база знань формується на етапі проектування бізнес-процесів та доповнюється при їх виконанні за результатами аналізу їх поведінки та виявлення нових залежностей між контекстом і діями процесів. На основі розробленого принципу запропоновано метод автоматизованої побудови бази знань інформаційної системи процесного управління. Метод передбачає виявлення зв'язків між атрибутами об'єктів, з якими оперує бізнес-процес, а також зв'язків між значеннями цих атрибутів.

Бібліогр.: 11 найм.

УДК 517.95 : 517.988

**Принцип и метод эволюционного построения базы знаний на основе анализа логов ИС процессного управления** / О.В. Чала // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 80–84.

Рассмотрена проблема выявления и формализации знаний в информационной системе процессного управления. Предложен принцип эволюционного построения базы знаний на основе анализа логов информационной системы. В соответствии с данным принципом, база знаний формируется на этапе проектирования бизнес-процессов и дополняется при их выполнении в результате анализа их поведения и выявления новых зависимостей между контекстом и действиями процессов. На основе разработанного принципа предложен метод автоматизированного построения базы знаний информационной системы процессного управления. Метод предполагает выявление связей между атрибутами объектов, с которыми оперирует бизнес-процесс, а также связей между значениями этих атрибутов.

Библиогр.: 11 найм.

UDC 517.95 : 517.988

**Development of knowledge base after results of analysis of the logs of the process management information system** / O.V. Chala // Bionics of intelligence: Sci. mag. — 2017. — № 1 (88). — P. 80–84.

The problem of identification and formalization of knowledge in the information system of process management is considered. The principle of evolutionary construction of the knowledge base based on the analysis of logs of the information system is proposed. In accordance with this principle, the knowledge base is formed at the stage of designing business processes and is supplemented when executed on the basis of the analysis of their behavior and the discovery of new relationships between the context and the actions of processes. Based on the developed principle, the method of automated construction of the knowledge base of the information system of process control is proposed. The method involves identifying the relationships between the attributes of objects that the business process operates with, and the relationships between the values of these attributes.

Ref.: 11 items.

УДК 004.81

**Розпізнавання емоційного стану людини за допомогою згорткових штучних нейронних мереж.** / О.Г. Руденко, О.О. Безсонов, Д.Г. Смерчинський // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 85–89.

У статті запропоновано метод розпізнавання емоційного стану людини за допомогою згорткових штучних нейронних мереж. Як свідчать результати моделювання, використання ЗНМ є досить ефективним при вирішенні задач розпізнавання образів, зокрема задачі визначення емоційного стану людини. Подальшого вивчення потребує питання робастності алгоритмів розпізнавання в умовах різного роду завад.

Лл. 4. Бібліогр.: 7 найм.

УДК 004.81

**Распознавания эмоционального состояния человека с помощью сверточных искусственных нейронных сетей.** / О.Г. Руденко, А.А. Бессонов, Д.Г. Смерчинський // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 85–89.

В статье предложен метод распознавания эмоционального состояния человека с помощью сверточных искусственных нейронных сетей. Как свидетельствуют результаты моделирования, использование СНС является достаточно эффективным при решении задач распознавания образов, в частности задачи определения эмоционального состояния человека. Дальнейшего изучения требует вопрос робастности алгоритмов распознавания в условиях различного рода помех.

Ил. 4. Библиогр. : 7 найм.

UDK 004.81

**Recognition of the emotional state of a person by means of convolutional artificial neural networks.** / O.G. Rudenko, O.O. Bezsonov, D.G. Smerchynskii // Bionics of intelligence: Sci. mag. — 2017. — № 1 (88). — P. 85–89.

In the article the method of recognition the emotional state of a person with the help of convolutional artificial neural networks is proposed. According to the results of simulation, the use of CNN is quite effective in solving problems of pattern recognition, including tasks of determining the emotional state of a person. The question of the robustness of recognition algorithms in conditions of various kinds of interferences requires further study.

Fig. 4. Ref.: 7 items.

УДК 004.9:530.1

**Підхід до роботи зі слабоструктурованими медичними даними на основі використання ваг ребер для документо-орієнтованої графової бази даних** / І.Б. Швороб // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 90–95.

У зв'язку із швидким збільшенням обсягу слабоструктурованих і неструктурованих даних, питання про їх оптимальне збереження та подальшу роботу з ними є досить важливим. Для покращення результатів роботи зі збереженими даними розглянуто спосіб застосування зважених графів для об'єктів слабоструктурованих даних. У даній роботі запропоновано підхід до роботи зі слабоструктурованими медичними даними на основі застосування ваг ребер для документо-орієнтованої бази даних.

Лл. 11. Бібліогр. : 4 найм.

УДК 004.9:530.1

**Подход к работе с слабоструктурированными медицинскими данными на основе использования весов ребер для документо-ориентированной графовой базы данных** / И.Б. Швороб // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 90–95.

В связи с быстрым увеличением объема слабоструктурированных и неструктурированных данных, вопрос об их оптимальном сохранении и дальнейшей работе с ними является достаточно важным. Для улучшения результатов работы с сохраненными данными рассмотрено способ применения взвешенных графов для объектов слабоструктурированных данных. В данной работе предложен подход к работе со слабоструктурированными медицинскими данными на основе применения весов ребер для документо-ориентированной базы данных.

Ил. 11. Библиогр.: 4 найм.

UDC 004.9:530.1

**The approach to working with semistructured medical data based on the usage of edge weights for a document-oriented graph database** / I.B. Shvorob // Bionics of intelligence: Sci. mag. — 2017. — № 1 (88). — P. 90–95.

Due to the rapid increase in the volume of semistructured and unstructured data, the question of their optimal saving and further work with them is very important. To improve the results of work with saved data, we consider the way of using weighted graphs for objects of semistructured data. In this paper we propose an approach to work with semistructured medical data based on the usage of edge weights for a document-oriented database.

Fig. 11. Ref.: 4 items.

УДК 004.89

**Комп'ютерне планування оперативних втручань на основі CFD-аналізу / А.С. Нечипоренко, Г.А. Зацеркляний // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 96–100.**

В роботі розроблено інформаційну технологію планування оперативних втручань на основі CFD-аналізу, яка дозволяє враховувати аеродинамічні властивості каналів нерегулярної форми. За допомогою побудови індивідуальних тривимірних моделей пацієнтів здійснюється розрахунок просторових характеристик моделей анатомічних конфігурацій. Розроблену інформаційну технологію покладено в основу створення підсистеми планування оперативних втручань, яка входить до складу ринологічної інформаційної системи. Використання запропонованого підходу дозволяє уникнути зайвих оперативних втручань та здійснювати планування операцій на якісно новому технологічному рівні.

Іл. 5, Бібліогр.: 11 найм.

УДК 004.89

**Компьютерное планирование оперативных вмешательств на основе CFD-анализа / А. С. Нечипоренко, А. Г. Зацеркляний // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 96–100.**

В работе предложена информационная технология планирования оперативных вмешательств на основе CFD-анализа, которая позволяет учитывать аэродинамические свойства воздушного потока в канале нерегулярной формы. С помощью создания индивидуальных трехмерных моделей носовой полости осуществляется учёт пространственных характеристик моделей анатомических конфигураций. На основе разработанной информационной технологии создана подсистема планирования оперативных вмешательств, которая входит в состав ринологической информационной системы. Использование предложенного подхода позволяет избежать лишних оперативных вмешательств, а также достичь экономического эффекта в условиях страховой медицины.

Ил. 5, Библиогр.: 11 наим.

UDC 004.89

**Computer-based planning of surgical interventions based on CFD-analysis / A. S. Nechiporenko, H.A. Zatserklyanyi // Bionics of intelligence: Sci. mag. — 2017. — № 1 (88). — P. 96–100.**

The information technology of planning of operative interventions was proposed. It consists of main processes: post-processing of CT-scans, 3D model rendering, CFD-analysis and decision-making stage. The technology is based on CFD-analysis for calculation and visualization of characteristics of breathing process. Such approach allows specialists to consider aerodynamics of nasal cavity. Using the proposed technology allows to avoid unnecessary surgical interventions, as well as to achieve an economic effect in the conditions of insurance medicine.

Fig. 5, Ref.: 11 items.

УДК 004.42

**Розробка та реалізація прототипу інформаційно-аналітичної системи для медичних закладів м. Харкова / О.Б. Волощук, О.М. Берест, О.Є. Гриньова // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 101–106.**

У статті досліджено можливість удосконалення процесу ведення обліку в стаціонарних відділеннях медичних установ м. Харкова шляхом впровадження інформаційно-аналітичної системи. Проаналізовано існуючі медичні інформаційні системи, виявлено їх переваги та недоліки. Відповідно до особливостей медичного сектора і переслідуваних цілей сформульовані вимоги до системи. На підставі наказів Міністерства охорони здоров'я України було визначено список користувачів відповідно до професіями співробітників установ охорони здоров'я. Також були розроблені база даних і призначений для користувача інтерфейс.

Табл. 2. Іл. 7. Бібліогр.: 10 найм.

УДК 004.42

**Разработка и реализация прототипа информационно-аналитической системы для медицинских учреждений г. Харькова / Е.Б. Волощук, О.М. Берест, Е.Е. Гринева // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 101–106**

В статье исследованы возможности совершенствования процесса ведения учета в стационарных отделениях медицинских учреждений г. Харькова путем внедрения информационно-аналитической системы. Проанализированы существующие медицинские информационные системы, выявлены их преимущества и недостатки. В соответствии с особенностями медицинского сектора и преследуемых целей сформулированы требования к системе. На основании приказов Министерства здравоохранения Украины был определен список пользователей в соответствии с профессиями сотрудников учреждений здравоохранения. Также были разработаны база данных и пользовательский интерфейс.

Табл. 2. Рис. 7. Библиогр. : 10 наим.

UDC 004.42

**Development and implementation of a prototype of the information-analytical system for medical institutions in Kharkiv / O.B.Voloshchuk, O.M. Berest, O.Ye. Grynyova // Bionics of intelligence: Sci. mag. — 2017. — № 1 (88). — P. 101–106.**

The article is devoted to the possibilities of improving the registration process in the in-patient departments of medical institutions of Kharkiv through the introduction of an information-analytical system. The existing medical information systems are analyzed, their advantages and disadvantages are revealed. According to the peculiarities of the medical sector and the pursued goals, the requirements for the system are formulated. On the basis of orders from the Ministry of Health of Ukraine, a list of users has been defined in accordance with the professions of health care providers. A database and user interface have also been developed.

Fig. 7. Tab. 2. Ref.: 10 items.



УДК 004.652:004.85

**Навчаюча система підтримки процесу проектування баз даних** / О.О. Мазурова, М.О. Семікін, М.С. Широкопетлева // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 107–111.

Робота присвячена розробці навчаючого веб-застосування для підтримки процесу проектування баз даних. В роботі запропоновано математичний опис процесу проектування баз даних, який моделює взаємозв'язок етапів аналізу, концептуального, ER- та логічного моделювання. На основі понять сутності та атрибуту бази даних промодельовано зв'язок між основними складовими моделей баз даних. На основі математичного опису запропоновано алгоритм та розроблено навчаючу систему підтримки проектування баз даних.

Бібліогр.: 4 найм.

УДК 004.652:004.85

Обучающая система поддержки процесса проектирования баз данных / О.О. Мазурова, М.О. Семикин, М.С. Широкопетлева // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 107–111.

Работа посвящена разработке обучающего веб-приложения для поддержки процесса проектирования баз данных. В работе предложено математическое описание процесса проектирования баз данных, которое моделирует взаимосвязь этапов анализа, концептуального, ER- и логического моделирования. На основе понятий сущности и атрибута базы данных смоделирована связь между основными составляющими моделей баз данных. На основе математического описания предложен алгоритм и разработана обучающая система поддержки проектирования баз данных.

Библиогр.: 4 найм.

UDK 004.652:004.85

**Educational system for database design guidance** / O.O.Mazurova, M.A. Semikin, M.S. Shirokopetleva // Bionics of intelligence: Sci. mag. — 2017. — № 1 (88). — P. 107–111.

The study focuses on the development of an educational web application that supports the process of database design. The paper offers a mathematical description of the database design process, which simulates the relationship between the stages of analysis, conceptual, ER and logical modelling. The relationship between the main components of database models is presented based on the notions of entity and attribute of a database. Based on the mathematical description, an algorithm is proposed and an educational system for database design guidance is developed.

Ref.: 4 items.

УДК 004.05

**Розробка сервісу для забезпечення дистанційного керування приладами та пристроями розумного дому "SmartHouse" із використанням IoT рішень** / К.Г. Онищенко, І.В. Афанасьєва, І.І. Арсеній // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 112–116.

Проведено аналіз прийнятих архітектурних та програмних рішень, наведені обґрунтування для їх використання. Виконано моделювання та проектування програмної системи. Створено сервіс для керування пристроями та приладами розумного дому.

Лл.: 6. Бібліогр.: 5 найм.

УДК 004.05

**Разработка сервиса для обеспечения дистанционного управления приборами и устройствами умного дома "SmartHouse" с использованием IoT решений** / К.Г. Онищенко, И.В. Афанасьева, И.И. Арсеній // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. — 2017. — № 1 (88). — С. 112–116.

Проведен анализ принятых архитектурных и программных решений, приведены обоснования для их использования. Выполнено моделирование и проектирование программной системы. Создан сервис для управления устройствами и приборами умного дома.

Илл.: 6. Библиогр.: 5 найм.

UDC 004.05

**Development of the service for providing remote control of intelligent home devices "SmartHouse" using internet of things solutions** / K.G. Onyshchenko, I.V. Afanasieva, I.I. Arseniy // Bionics of intelligence: Sci. mag. — 2017. — № 1 (88). — P. 112–116.

The analysis of accepted architectural and program solutions is made, the reasons for their use are given. A simulated and illustrated scheme of the work of the software system. Created service for managing devices and devices of a smart home.

Fig.: 6. Ref.: 5 items.

## ОБ АВТОРАХ

<b>Арсеній Ігор Ігорович</b>	112	м.н.с. інфекційного відділення інститута загальної та невідкладної хірургії НАМН України, м. Харків
<b>Асеєв Георгій Георгійович</b>	55	доктор технічних наук, професор, зав. кафедри інформаційних технологій, Харківська державна академія культури
<b>Афанасьєва Ірина Віталіївна</b>	112	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Безсонов Олександр Олександрович</b>	85	доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця
<b>Берест Олеся Михайлівна</b>	101	студентка кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Волощук Олена Борисівна</b>	101	кандидат технічних наук, доцент кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Гребеннік Ігор Валерійович</b>	22	доктор технічних наук, професор, зав. кафедри системотехніки, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Гриньов Сергій Анатолійович</b>	15	аспірант кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Гриньова Олена Євгенівна</b>	101	викладач кафедри інформаційних систем, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця
<b>Дереза Едуард Ернстович</b>	65	аспірант кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Дудінова Ольга Богданівна</b>	75	аспірантка кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Зацеркляний Георгій Альбертович</b>	96	аспірант кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Каграманян Олександр Георгійович</b>	45	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри природничих наук Харківського національного університету ім. В.М. Каразіна
<b>Коваленко Ганна Андріївна</b>	22	кандидат технічних наук, асистент кафедри системотехніки, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Кончаковська Оксана Сергіївна</b>	60	магістрантка кафедри прикладної математики, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Левківський Віталій Леонідович</b>	36	старший викладач кафедри програмного забезпечення систем, Житомирський державний технічний університет
<b>Литвин Олег Миколайович</b>	50	доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри вищої та прикладної математики, Українська інженерно-педагогічна академія
<b>Мазурова Оксана Олексіївна</b>	107	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Марчук Галина Вікторівна</b>	36	асистент кафедри програмного забезпечення систем, Житомирський державний технічний університет
<b>Міхнов Дмитро Кіндратович</b>	41	кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки

<b>Міхнова Аліна Володимирівна</b>	41	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Нечипоренко Аліна Сергіївна</b>	96	кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Онищенко Костянтин Георгійович</b>	112	студент кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Панішев Анатолій Васильович</b>	36	доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, Житомирський державний технічний університет
<b>Передерій Віталій Сергійович</b>	65	аспірант кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Повзун Олексій Іванович</b>	69	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Красноармійського індустріального інституту «ДонНТУ»
<b>Політ Максим Романович</b>	65	аспірант кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Романова Тетяна Євгеніївна</b>	22, 29	доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу математичного моделювання та оптимального проектування, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України
<b>Руденко Олег Григорійович</b>	85	доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця
<b>Семикін Максим Олександрович</b>	107	студент кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Сидоров Максим Вікторович</b>	60	кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри прикладної математики, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Смерчинський Дмитро Геннадійович</b>	85	студент, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця
<b>Стецюк Петро Іванович</b>	29	доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу методів негладкої оптимізації, Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України
<b>Томанова Ірина Сергіївна</b>	50	аспірантка кафедри вищої та прикладної математики, Українська інженерно-педагогічна академія
<b>Удовенко Сергій Григорович</b>	15, 75	доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Урняєва Інна Анатоліївна</b>	22	асистент кафедри системотехніки, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Хлуд Ольга Михайлівна</b>	29	аспірант відділу математичного моделювання та оптимального проектування, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України
<b>Чала Лариса Ернестівна</b>	15	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Чала Оксана Вікторівна</b>	80	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки

---

<b>Четвериков Григорій Григорович</b>	45	доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Чінілін Андрій Васильович</b>	41	лікар-хірург судинний інститута загальної та невідкладної хірургії НАМН України, м. Харків
<b>Чиркова Катерина Сергіївна</b>	41	аспірантка кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Швороб Ірина Богданівна</b>	90	здобувач кафедри інформаційних систем та мереж, Національний університет «Львівська політехніка»
<b>Шергин Вадим Леонідович</b>	65	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Шеховцов Сергій Борисович</b>	22	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системотехніки, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Широков Володимир Анатолійович</b>	3	доктор технічних наук, професор, академік НАНУ, директор Українського мовно-інформаційного фонду НАНУ, м. Київ
<b>Широкопетлева Марія Сергіївна</b>	107	старший викладач кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Шляхов Владислав Вікторович</b>	45	доктор технічних наук, професор, професор кафедри вищої математики, Харківський національний університет радіоелектроніки



## ПРАВИЛА оформлення рукописів для авторів науково-технічного журналу «БІОНІКА ІНТЕЛЕКТУ»

Науково-технічний журнал «Біоніка інтелекту» приймає до друку написані спеціально для нього оригінальні рукописи, які раніше ніде не друкувались. Структура рукопису повинна бути такою: індекс УДК, відомості про авторів, заголовок, анотація, ключові слова, вступ, основний текст статті, висновки, список використаної літератури, резюме англійською мовою.

Відповідно до Постанови ВАК України від 15.01.2003 №7-05/1 (Бюлетень ВАК, №1, 2003, с. 2), стаття повинна мати такі необхідні елементи: постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій і виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми в даній області; формулювання цілей та завдань дослідження; виклад основного матеріалу досліджень з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження та перспективи подальших досліджень у даному напрямку.

Статті мають бути виконані в редакторі Microsoft Word. Формат сторінки – А4 (210×297 мм), поля: верхнє – 25 мм, нижнє – 20 мм, ліве, праве – 17 мм. Кількість колонок – 2, з інтервалом між ними 5 мм, основний шрифт Times New Roman, кегль основного тексту – 10 пунктів, міжрядковий інтервал – множник (1,1), абзацний відступ – 6 мм. Обсяг рукопису – від 6 до 15 сторінок (мови: російська, українська, англійська).

УДК друкується з першого рядка, без відступів, вирівнювання по лівому краю.

*ПІБ автора* (-ів), назва статті, назва та адреса учбового закладу необхідно надати повністю російською, українською та англійською мовами.

*Назва статті* друкується прописними літерами; шрифт прямий, напівжирний, кегль 12.

*Назви розділів* нумерують арабськими цифрами, виділяють жирним шрифтом. Відступи для назви статті, ініціалів та прізвищ авторів, відомостей про авторів, назв розділів, вступу та висновків, списку літератури: зверху – 6 пт, знизу – 3 пт.

Стаття повинна починатися з *анотації* російською, українською та англійською мовами обсягом 50–100 слів. У тексті анотації відзначається актуальність, постановка проблеми, шляхи вирішення проблеми, результати та висновки (абзац 4–10 рядків, кегль 9).

Після кожної анотації наводяться *ключові слова* мовою анотації (4–10 слів з тексту статті, які з точки зору інформаційного пошуку несуть змістовне навантаження, через кому в називному відмінку, кегль 9) (див. приклад оформлення статті).

*Рисунки та таблиці* (чорно-білі, контрастні) розміщуються у тексті після першого посилання у вигляді окремих об'єктів і нумерують арабськими цифрами наскрізною нумерацією за наявності більше ніж одного об'єкта. Невеликі схеми, що складаються з 3–4 елементів виконують, використовуючи вставку об'єкта Рисунок Microsoft Word. Більш складні виконують у графічних редакторах у вигляді чорно-білих графічних файлів форматів .tif, .jpg, .wmf, .cdr із розділенням 300 dpi. Рисунки мають міститися у текстовому файлі й обов'язково подаватися окремими файлами з відповідними назвами (наприклад, рис1.jpg).

Усі елементи рисунка, включаючи написи, повинні бути згруповані. Усі написи в рисунках і таблицях мають бути виконані шрифтом Times New Roman, кегль у рисунках – 10, у таблицях – 9.

Рисунок повинен мати центрований підпис (поза рисунком), шрифт 9, відступи зверху і знизу по 6 пт. Ширина рисунка має відповідати ширині колонки (або ширині сторінки).

*Формули, символи, змінні* повинні бути набрані в редакторі формул **MathType**. Формули розміщують посередині рядка й нумерують за наявності посилань на них у рукописі. Шрифт – Times New Roman. Висота змінної – 10 пунктів, великих і малих індексів – 8 пт, основний математичний символ – 12 (10) пт. Змінні, позначені латинськими літерами, набирають курсивом, грецькі літери, скорочення російських слів і цифри – прямим написанням. Змінні, які є в тексті, також набирають у редакторі формул.

*Список літератури* вміщує опубліковані джерела, на які є посилання в тексті (принаймні третину таких, що включено до науково-метричних баз (наприклад, SCOPUS)), укладені у квадратні дужки, друкують загальним нумерованим списком, кегль 9 пт, відступ зверху – 6 пт.

*Резюме*. Обов'язково треба підготувати розгорнуте резюме англійською мовою (0,5 – 1 сторінки, Times New Roman, кегль – 9) з російським перекладом.

Структура резюме: ПІБ автора (-ів), назва статті англійською мовою. Текст: Background: позначається історія питання, похідні дані; Materials and methods: матеріали та методи; Results: результати роботи; Conclusion: висновки.

Після резюме з відступом зверху 6 пт зазначають дату подання статті до редколегії. Число та місяць задають двозначними числами через крапку. Розмір шрифту – 9 пт, курсив, вирівнювання по правому краю.

Разом із рукописом (на аркушах білого паперу формату А4 щільністю 80–90 г/м<sup>2</sup>, надрукований на лазерному принтері, у 2-х примірниках) необхідно подати такі документи:

1. Заяву за наведеним зразком, яку повинні підписати всі автори:

«Прошу прийняти статтю .....(вказати прізвища авторів, назву статті) обсягом ....сторінок (вказати кількість сторінок) для опублікування в науково-технічному журналі «Біоніка інтелекту». Оплату гарантуємо.

Відомості про авторів: (вказати прізвище, ім'я та по батькові, місце роботи, вчений ступінь, наукове звання, контактний телефон, поштову та електронну адресу).

Підписи авторів».

2. Акт експертизи про можливість опублікування матеріалів у відкритому друці (для співр. ХНУРЕ).

3. Рецензію, підписану доктором наук.

4. Відомості про авторів.

5. Електронний варіант рукопису, реферату та відомостей про авторів.

6. Оплату за публікацію.

Необхідно також вказати один з наступних тематичних розділів, якому відповідає рукопис:

1. Теоретичні основи інформатики та кібернетики. Теорія інтелекту.

2. Математичне моделювання. Системний аналіз. Прийняття рішень.

3. Інтелектуальна обробка інформації. Розпізнавання образів.

4. Інформаційні технології та програмно-технічні комплекси.

5. Структурна, прикладна та математична лінгвістика

6. Дискусійні повідомлення.

**АЛГЕБРО-ЛОГІЧНІ ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИРОДНОЇ МОВИ**

Проведено аналіз алгебро-логічної структури природної мови. Розглянуто концептуально-методологічний підхід до мови людини, що дозволяє сприймати її як деяку алгебру, а її тексти – як формули цієї алгебри.

МОВА ПРИРОДНА, АЛГЕБРА ПРЕДИКАТИВ, ВІДНОШЕННЯ, АЛГЕБРА ПРЕДИКАТНИХ ОПЕРАЦІЙ

Четвериков Г.Г., Вечирская И.Д. Алгебро-логические средства моделирования естественного языка. Проведен анализ алгебро-логической структуры естественного языка. Рассмотрен концептуально-методологический подход к языку человека, что позволяет воспринимать ее как некоторую алгебру, а ее тексты – как формулы этой алгебры.

ЕСТЕСТВЕННЫЙ ЯЗЫК, АЛГЕБРА ПРЕДИКАТОВ, ОТНОШЕНИЯ, АЛГЕБРА ПРЕДИКАТНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Chetverikov G.G., Vechirska I.D. Algebra-logical methods of natural language modeling. The analysis of the algebra-logical structure of natural language is performed. The conceptual-methodological approach to human language is considered, which allows perceiving it as some algebra, and its texts as a formula of this algebra.

NATURAL LANGUAGE, ALGEBRA OF PREDICATES, RELATIONS, ALGEBRA OF PREDICATE OPERATIONS

**Вступ**

Формальним моделям семантико-синтаксичних структур мови відводиться вирішальна роль у сучасній проблематиці комп'ютерної лінгвістики та системах штучного інтелекту (ШтІ). Це пов'язано з необхідністю створення програмно-апаратного комплексу генерації та аналізу речень природної мови (ПМ).

**1. Дослідження алгебро-логічної структури природної мови**

У роботі використовується апарат алгебри предикатів [1]. Множина  $U$  може бути як скінченною, так нескінченною. У першому випадку простір  $U^m$  називатимемо скінченним, а в іншому – нескінченним.

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } (x_1, x_2, \dots, x_n) \notin T \\ 1, & \text{якщо } (x_1, x_2, \dots, x_n) \in T. \end{cases} \quad (1)$$

Згідно з (1) можливий перехід від будь-якого відношення  $T$  до відповідного йому предикату  $P$ . Предикат  $P$ , що знаходимо по (1), називатимемо характеристичною функцією відношення  $T$ .

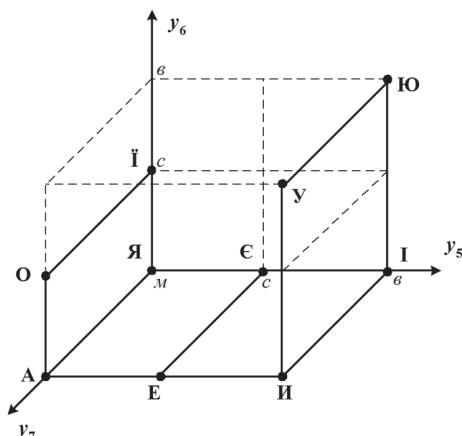


Рис. 1. Тривимірний простір ознак для голосних фонем

**2. Шляхи автоматизації обробки мовної інформації**

У даний час в системах штучного інтелекту машинний словник та комплекс програм (тезауруси) використовуються, як правило, для виконання будь-якої однієї функції.

**Висновки**

У статті запропонована узагальнену структуру інтелектуальної системи, яка відповідає новій інформаційній технології рішення задач на ЕОМ, що орієнтовані на досягнення високорівневої технології обробки мовної інформації (отримання нової якості). Істотно новим в роботі є розширення алгебри скінченних предикатів (АСП). Тепер вона охоплює не тільки скінченні предикати, а також – нескінченні. Тепер область її рекомендованого застосування розширена та охоплює довільні відношення, які далі будемо описувати за допомогою ДКАП.

**Список літератури:**

1. Мальцев А.И. Алгебраические системы. – М.: Наука, 1970. – 392 с. 2. Четвериков Г.Г., Дударь З.В., Вечирская И.Д. Дискретные структуры. – Харьков: НУРЭ, 2015. – 322 с. 3. Машталир В.П., Шляхов В.В., Яковлев С.В. Групповые структуры на фактор-множествах в задачах классификации // Кибернетика и системный анализ. – 2014. – №4. – с. 27–42.

**Resume**

G.G. Chetverikov, I.D. Vechirskaia  
**ALGEBRA-LOGICAL METHODS OF NATURAL LANGUAGE MODELING**

**Background:** Formal models of semantic-syntactic structures of language are given a decisive role in the modern problems of computer linguistics and systems of artificial intelligence. This is due to the need to create a software and hardware complex for generation and analysis of natural language sentences. Automatic processing of natural language is

an important part in the construction of artificial intelligence systems.

**Materials and methods:** Predicate algebra apparatus is used in this work. Finite and infinite sets are considered. According to formulas described in this study, a transition from any relation  $T$  to corresponding predicate  $P$  is possible. In this case the predicate  $P$  found by formulas is the characteristic function of the relation  $T$ .

**Results:** The algebraic structure of the natural language is analyzed. The conceptual-methodological approach to human language is considered. This approach allows perceiving the language as some algebra, and its texts as formulas of this algebra.

**Conclusion:** The article proposes a generalized structure of the intellectual system, which are oriented to the achievement of high-level technology of the processing of language information. Essentially new in the work is the expansion of algebra of finite predicates to infinite ones.

Г.Г. Четвериков, И.Д. Вечирская

#### АЛГЕБРО-ЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА

**Background:** Формальные модели семантико-синтаксических структур языка играют решающую роль в современной проблематике компьютерной лингвистики

и систем искусственного интеллекта. Это связано с необходимостью создания программного и аппаратного комплекса для генерации и анализа предложений на естественном языке. Автоматическая обработка естественного языка является важной составляющей в построении систем искусственного интеллекта.

**Materials and methods:** В этой работе используется аппарат предикатной алгебры. Рассматриваются конечные и бесконечные множества. Согласно формулам, описанным в этом исследовании, возможен переход от любого отношения  $T$  к соответствующему предикату  $P$ . В этом случае предикат  $P$ , найденный по формулам, является характеристической функцией отношения  $T$ .

**Results:** Выполнен анализ алгебраической структуры естественного языка. Рассмотрен концептуально-методологический подход к человеческому языку. Такой подход позволяет воспринимать язык как некоторую алгебру, а ее тексты — как формулы этой алгебры.

**Conclusion:** В статье предлагается обобщенная структура интеллектуальной системы, ориентированная на достижение высокоуровневой технологии обработки языковой информации. Существенно новым в работе является расширение алгебры конечных предикатов на бесконечные.

*Надійшла до редакції 15.02.2007*

*Наукове видання*

**БІОНІКА ІНТЕЛЕКТУ**  
**інформація, мова, інтелект**

**Науково-технічний журнал**

**№ 1 (88)**

**2017**

В.о. головного редактора — *Г. Г. Четвериков*

Відповідальний редактор — *І. Д. Вечірська*

Комп'ютерна верстка — *О. Б. Ісаєва*

Рекомендовано Вченою Радою  
Харківського національного університету радіоелектроніки  
(протокол № 12 від 29.06.2017 р.)

Адреса редакції:

Україна, 61166, Харків-166, просп. Науки, 14,  
Харківський національний університет радіоелектроніки, к. 127  
тел. 702-14-77, факс 702-10-13,  
e-mail: ira\_se@list.ru

---

Підписано до друку 29.06.2017. Формат 60 x 84 1/8. Друк ризографічний.  
Папір офсетний. Гарнітура Newton. Умов. друк. арк. 15,35. Обл.-вид. арк. 15,0.  
Тираж 100 прим.

Віддруковано в типографії ФОП Андреев К.В.  
61166, Харків, вул. Серпова, 4  
ep.zakaz@gmail.com  
тел. 063-993-62-73