

# БИОНИКА ИНТЕЛЛЕКТА

ИНФОРМАЦИЯ, ЯЗЫК, ИНТЕЛЛЕКТ

---

---

№ 1 (90)

2018

---

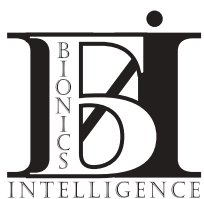
---

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**Основан в октябре 1967 г.**

Учредитель и издатель  
*Харьковский национальный университет радиоэлектроники*

Периодичность издания – *2 раза в год*



Научно-технический журнал  
«БИОНИКА ИНТЕЛЛЕКТА»

ISSN 0555-2656

Основан Харьковским национальным университетом  
радиоэлектроники в 1967 году

Реферирование и индексирование:

Google Scholar

Microsoft Academic

ACADEMIA

INDEX  COPERNICUS  
I N T E R N A T I O N A L

ResearchGate



---

Журнал включен в список научных специализированных изданий Украины  
по техническим и физико-математическим наукам  
согласно приказа Министерства образования и науки Украины № 820 от 11.07.2016

УДК 519.62



**Владимир Широков**

Украинский языково-информационный фонд

Украина, 03039, г. Киев 39, Голосеевский проспект, 3. тел./факс: 380-44 525-8165

e-mail: vshirokov48@gmail.com

**ЭВОЛЮЦИЯ КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЕСТЕСТВЕННЫЙ ЗАКОН  
(ПРОЛЕГОМЕНЫ К БУДУЩЕЙ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ЭВОЛЮЦИИ).  
ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ**

Во третьей части работы изложены эволюционные аспекты человеческого общества, базирующиеся на теории сложности. Приведены теоретические и фактические данные касательно динамики численности населения как эволюционного фактора. Подчеркнуто, что с 80-90 годов прошлого столетия наступила эпоха так называемого Демографического перехода и параметр «численность населения» перестал играть роль эволюционного фактора.

Выполнен анализ эволюционных аспектов финансовых этапов Производственного механизма. Предложены меры сложности для данных этапов и показано, что современный этап характеризуется экспоненциальным ростом сложности. Введено понятие паразитной сложности, предложена модель и приведена оценка эффективности построенной на долларе мировой финансовой системы за период с 1971 по 2016 гг.

Продемонстрировано, что в силу неконтролируемого роста сложности Мир все сильнее скатывается в глобальный кризис, который в силу его онтологического характера не может быть разрешен путем паллиативов. С позиций теории эволюционной сложности проанализирована «доктрина управляемого хаоса», а также приведены возможные иные варианты борьбы с кризисными явлениями. Среди этих вариантов наиболее перспективными автору представляются варианты, связанные с управляемой сложностью, научно-техническими инновациями и квантовой информацией. С позиций теории эволюционной сложности проанализированы гипотезы технологической сингулярности и трансгуманизма.

**ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ЭВОЛЮЦИИ, МЕХАНИЗМ ЭВОЛЮЦИИ, СЛОЖНОСТЬ, ОСНОВНОЙ ЗАКОН ЭВОЛЮЦИИ, ДОКТРИНА УПРАВЛЯЕМОГО ХАОСА, ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИНГУЛЯРНОСТЬ, ТРАНСГУМАНИЗМ, КВАНТОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

**Volodymyr Shyrovkov. EVOLUTION AS UNIVERSAL NATURAL LAW (PROLEGOMENA TO THE FUTURE GENERAL EVOLUTION THEORY).** In the third part of the work evolutionary aspects of human society based on the theory of complexity are presented. Theoretical and factual data are presented on population dynamics as an evolutionary factor. It is emphasized that from the 80-90s of the last century the era of the so-called Demographic transition came and the parameter “population size” ceased to play the role of an evolutionary factor.

The evolutionary aspects of the financial stages of the Production Mechanism are analyzed. The complexity measures for these stages are proposed and it is shown that the present stage is characterized by an exponential increase in complexity. The notion of parasitic complexity is introduced, a model is proposed and an estimate of the effectiveness of the world financial system built on the dollar for the period from 1971 to 2016 is given.

It is demonstrated that, due to the uncontrollable growth of complexity, the world is increasingly slipping into a global crisis, which due to its ontological nature can not be resolved by palliatives. From the standpoint of the theory of evolutionary complexity, the “doctrine of controlled chaos” is analyzed, as well as possible other options for dealing with crisis phenomena. Among these options, the most promising are the options associated with managed complexity, scientific and technological innovation and quantum information. From the standpoint of the theory of evolutionary complexity, the hypotheses of technological singularity and transhumanism are analyzed.

**GENERAL EVOLUTION THEORY, EVOLUTION MECHANISM, COMPLEXITY, BASIC LAW OF EVOLUTION, DOCTRINE OF CONTROLLED CHAOS, TECHNOLOGICAL SINGULARITY, TRANSHUMANISM**

**Володимир Широков. ЕВОЛЮЦІЯ ЯК УНІВЕРСАЛЬНИЙ ПРИРОДНИЙ ЗАКОН (ПРОЛЕГОМЕНИ ДО МАЙБУТНЬОЇ ЗАГАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ЕВОЛЮЦІЇ).** У третій частині роботи викладені еволюційні аспекти людського суспільства, що базуються на теорії складності. Наведено теоретичні та фактичні дані щодо динаміки чисельності населення як еволюційного чинника. Підкреслено, що з 80-90 років минулого століття настала епоха так званого Демографічного переходу і параметр «чисельність населення» перестав грати роль еволюційного чинника.

Виконано аналіз еволюційних аспектів фінансових етапів Виробничого механізму. Запропоновано міри складності для даних етапів і показано, що сучасний етап характеризується експоненційним ростом складності. Введено поняття паразитної складності, запропоновано модель і наведено оцінку ефективності побудованої на доларі світової фінансової системи за період з 1971 по 2016 рр.

Продемонстровано, що в силу неконтрольованого зростання складності Світ усе сильніше скочується в глобальну кризу, яка в силу її онтологічного характеру не може бути розв’язана шляхом паліативів. З позицій теорії еволюційної складності проаналізовано «доктрину керованого хаосу», а також наведено можливі інші варіанти боротьби з кризовими явищами. Серед цих варіантів найбільш перспективними автору вбачаються варіанти, пов’язані із керованою складністю, науково-технічними інноваціями та квантової інформацією. З позицій теорії еволюційної складності проаналізовано гіпотези технологічної сингулярності і трансгуманізму.

**ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ЕВОЛЮЦІЇ, МЕХАНІЗМ ЕВОЛЮЦІЇ, СКЛАДНІСТЬ, ОСНОВНИЙ ЗАКОН ЕВОЛЮЦІЇ, ДОКТРИНА КЕРОВАНОВОГО ХАОСУ, ТЕХНОЛОГІЧНА СИНГУЛЯРНОСТЬ, ТРАНСГУМАНИЗМ, КВАНТОВА ІНФОРМАЦІЯ**

### Оценка сложности финансово-информационно- сетевого механизма

Проинтерпретируем мировую сетевую структуру с позиций Основного закона эволюции.

В конце 80-х начале 90-х годов прошлого столетия с ликвидацией мировой социалистической системы исчезли последние препятствия для неограниченной глобализации. Распался Советский Союз. Бывшие социалистические страны с энтузиазмом присоединились ко «всему цивилизованному миру». А по сути — «встроились» в нижние этажи всемирной финансовой пирамиды, кто с большим, кто с меньшим успехом.

Так или иначе, можно констатировать, что процесс эволюции Производственного механизма в каком-то смысле приблизился к своему логическому завершению, поскольку в мире почти не осталось зон для ничем не сдерживаемой глобализации. Чуткие к таким переменам футурологи среагировали мгновенно. Уже в 1989 году в журнале «*The National Interest*» появилось эссе Френсиса Фукуямы «Конец истории?» (Francis Fukuyama, «The End of History?»), а в 1992 году на основе этой статьи свет увидела его книга под красноречивым названием «Конец Истории или Последний Человек»<sup>1</sup>, уже без вопросительного знака в заглавии. В этой связи автор не может не вспомнить ироническое выражение гораздо более проникательного писателя — М. Е. Салтыкова-Щедрина из его гениальной «Истории одного города»: «*История прекратила течение своё*». Ведь уже ближайшее десятилетие убедительно продемонстрировало, что на самом деле мы имеем дело не столько с концом истории, сколько с началом некоторого ее нового этапа. Что подтверждает известную мысль о том, что история таки опережает мышление. Для нас этот новый этап связан именно со становлением финансово-информационно-сетевого механизма эволюции.

Хотелось бы подчеркнуть, что наступление тех или иных этапов Производственного механизма коррелировало с соответствующими техническими, технологическими и социальными инновациями. В этой связи отметим содержательную неоднородность факторов финансово-информационно-сетевого этапа, а именно: интернет представляет собой информационно-технологический фактор, распад социалистической системы — политический, а глобализация — социально-экономический. Все они дают свой вклад в определение меры сложности механизма эволюции.

Выше мы анализировали финансовые аспекты сложности, которые концентрируют социально-экономическую и политическую составляющие.

**В последние десятилетия** особо активизировались

<sup>1</sup> Francis Fukuyama. The End of History and the Last Man. 1992. Free Press. P. 418; ISBN 0-02-910975-2.

информационно-сетевые аспекты. В то же время, в процитированных выше работах в области «Network Science», посвященных теории сложных сетей, их сложность с количественной стороны, как правило, не анализируется. В лучшем случае, предлагается редукция к некоторой вычислительной схеме, для которой и может оцениваться вычислительная сложность, сопоставляемая затем сложности анализируемой реальной системы. Понятно, что в буквальной постановке использовать такие подходы в нашем случае не вполне уместно.

Исходя из нашего понимания сложности и «презумпции нулевого приближения» мы выбираем в качестве интегральной меры сложности финансово-информационно-сетевого этапа эволюции общий объем информации, циркулирующей в Сети.

Этот показатель в последнее время активно сканируется. В частности, по данным компании IDC объем данных, хранящихся в Интернете, в 2009 году приблизился к отметке в 487 эксабайт (487 млрд. Гб) и по прогнозам должен увеличиться в два раза в течение примерно полутора лет. Но уже в 2012 году IDC анонсировала, что в 2011 году общий мировой объем созданных и реплицированных человечеством данных превысил 1,8 зеттабайт (1,8 триллионов Гб), что более чем вдвое превысило предыдущий прогнозный темп. По дальнейшим прогнозам IDC количество данных на планете будет как минимум удваиваться каждые два года аж до 2020 года.

Итак, если основываться на данных темпах роста информации в Сети как количественном корреляте меры сложности финансово-информационно-сетевого этапа эволюции, то можно сделать вывод, что мир вступил в критический — экспоненциальный период роста сложности своего эволюционного механизма.

Косвенное подтверждение отмеченной экспоненциальности предоставляет так называемый Закон Мура — эмпирическое наблюдение, уточненный вариант которого 1975 года гласит, что количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 24 месяца<sup>2</sup>. С некоторыми дополнительными уточнениями Закон Мура продолжает свое действие до сих пор.

Что касается кризисов, то здесь данных гораздо больше. Например, в финансовой сфере. Как мы отмечали в первой части работы, в период с 1970 по 2013 годы наблюдалось более 400 больших банковских, валютных или долговых кризисов. Данные

<sup>2</sup> Часто цитируется интервал удвоения, равный 18 месяцам, связанный с прогнозом Давида Хауса из Intel. По его мнению, производительность процессоров должна удваиваться каждые 18 месяцев из-за сочетания роста количества транзисторов на процессоре и увеличения тактовых частот самих процессоров.

интернета на эту тему зашкаливают<sup>3</sup>.

Критические явления захлестнули и саму Сеть. Чрезвычайно активизировались в последнее время глобальные хакерские атаки, так что уже говорят о полномасштабных информационных войнах, кибервойнах и гибридных войнах. В военных и специальных структурах различных стран создаются кибервойска.

К анализу критических явлений мы еще вернемся, поскольку их общим внутренним источником, как нам представляется, является неконтролируемое возрастание сложности соответствующих систем и следующая из этого невозможность эффективного управления ими. Фактически, в наше время глобальное управление свелось к одному параметру — объему эмиссии доллара, а элементарная теория управления утверждает фатальную неизбежность кризисов в системе большой сложности, управляемой всего лишь одним параметром.

Таким образом, мы приходим к констатации **основного противоречия современной эпохи**, которое можно сформулировать следующим образом: «Необходимость **возрастания сложности** мировой системы для обеспечения её эволюции и одновременно необходимость **уменьшения** той же самой **сложности** ввиду невозможности обеспечить эффективное управление системой такой большой («экспоненциальной») сложности, которую приобрела «Сеть Сетей».

Действительно, можно написать символическое соотношение между управляемостью системы и её сложностью:

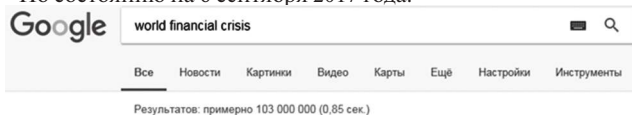
$$\langle \text{Управляемость} \rangle \cong \frac{1}{\langle \text{Сложность} \rangle}, \quad (1)$$

демонстрирующее, что управляемость системы обратно пропорциональна её сложности: чем сложнее система, тем труднее ею управлять. В предельном случае (в точке сингулярности) Сложность  $\rightarrow \infty$ , Управляемость  $\rightarrow 0$ . Таким образом, при вхождении в экспоненциальную зону роста сложности система становится практически неуправляемой, что служит главной причиной развивающихся в ней кризисных явлений. В этой связи целесообразно проанализировать особенности динамики сложности для различных механизмов эволюции.

### Замечания о феноменологии сложности. «Ловушка» сложности

Из предыдущего у читателя может сложиться впечатление, что мы представляем себе эволюцию как монотонный процесс неуклонного увеличения сложности механизма эволюции вплоть до его вхождения в критическую область. Такой вывод

<sup>3</sup> По состоянию на 6 сентября 2017 года:



можно было бы сделать, если чересчур буквально понимать картину «Обобщенная динамика механизма эволюции» (рис. 1 из первой части); мы ее продублируем ниже на рис. 4. Но на самом деле это не так, и картина выглядит гораздо неоднозначнее.

Во-первых, действительность устроена таким образом, что она как бы «сопротивляется» эволюционному процессу, сопровождающемуся увеличением сложности системы. То есть, параллельно с эволюционными в системе могут идти и антиэволюционные процессы. Эти эффекты можно проследить на каждом механизме эволюции.

Рассмотрим их на примере генетического механизма, следуя статье В. П. Щербакова «Эволюция как сопротивление энтропии»<sup>4</sup>. В ней автор утверждает следующее: «Существует всеобщее убеждение в самоценности биологической эволюции, понимаемой исключительно как создание новшеств. Уже по меньшей мере полтора столетия слова «прогресс», «эволюция» воспринимаются однозначно позитивно<sup>5</sup>. Только этой общей направленностью умов можно объяснить малое внимание к тому, что онтологическое содержание эволюции — это не просто сотворение новых форм, но сотворение форм, устойчивых к дальнейшим изменениям, что объективно дело выглядит таким образом, как будто эволюция борется против дальнейшей эволюции»<sup>6</sup>.

Отметим также, что и сам вопрос эволюции генов изучен далеко не полностью, хотя в

<sup>4</sup> Щербаков В.П. Эволюция как сопротивление энтропии// Журнал общей биологии. 2005. 66(3) : 195–211.

<sup>5</sup> Более того, воспринимаются почти как синонимы. (Авт.)

<sup>6</sup> В.П.Щербаков приводит настолько близкие и симпатичные нам рассуждения о феноменологии сложности, что мы позволим себе привести их в этой сноске: «Движение к большей сложности — очевидная общая тенденция эволюции биосферы. Однако сама сложность не означает ни более высокой приспособленности, ни какого-либо иного совершенства. Напротив, если иметь в виду задачу выживания, сохранения, сложное более чувствительно к деградации, чем простое. Используя «геометрическую модель» Фишера (Fisher, 1930), Ор (Or, 1998; 1999; 2000) и позднее Вэлч и Ваксман (Welch and Waxman, 2003) показали, что увеличение числа фенотипических признаков коррелирует со снижением скорости адаптации. Ор назвал это «ценой сложности». Стабильность существующих сложных систем критически зависит от наличия специфических, неслучайных связей между ее частями (Saunders, Ho, 1976).

Почему естественный отбор отбирает сложное? Может быть, это и не так. Наряду с появлением более сложного эволюция сохраняет и даже творит заново и более простые формы. Сложные отнюдь не вытесняют простых. Есть человек, но существуют (и процветают!) бактерии. Вся естественная история наличествует в сегодняшней природе (кроме гипотетических доклеточных форм жизни). Так что «стрела сложности» связана, по крайней мере отчасти, с тем, что эволюция по необходимости начинала с простого. Более древняя эволюция простых форм в большой мере уже себя исчерпала (достигла совершенства), и жизнеспособное новое возникает преимущественно на путях усложнения. Принцип селекции стабильных структур является общим для добиотической и биологической эволюции. Объекты Вселенной имеют очень разные времена жизни, от ничтожных долей секунды до миллиардов лет. В ходе эволюции идет замена эфемерных форм на более стабильные: сохраняется лишь то, что долго сохраняется. В живых системах сопротивление гибели достигается тем, что в ходе биологической эволюции сохраняется лишь то, что не изменяется».

историческом плане он является важнейшим. Поскольку в происхождении жизни выявлена изначальная роль РНК, то предполагают, что начало эволюции генов следует отнести на 3,5–4 млрд. лет назад, когда сформировались первые молекулы РНК, которые каким-то образом детерминировали синтез белков, т. е. были первыми хранителями генетической информации. Однако, когда выявилась необходимость в повышении эффективности синтеза белков, способность кодирования генетической информации перешла к ДНК, которая стала главным хранителем генетической информации. Что касается РНК, то она оказалась между ДНК и белком, став «переносчиком» информации. Конечно, эта гипотеза не имеет доказательств. Тем не менее, многие считают, что появление ДНК связано с усложнением структуры клеток и, следовательно, с необходимостью кодирования большего по сравнению с РНК объема информации. Другими словами, генетический код стал развиваться именно с началом участия ДНК в хранении генетической информации.

Однако вопрос происхождения самих молекулярных агентов генетического механизма (РНК и ДНК) также остается не ясным. В этой связи упомянем об эксперименте, проведенный еще в 1953 году Стэнли Миллером и Гарольдом Юри<sup>7</sup>. В обычной лабораторной колбе ими была воссоздана примерная атмосфера древней Земли, как её представляли в то время: метан, аммиак, водород, CO + водные пары. Сквозь всю эту смесь пропускались электрические разряды, имитировавшие молнии, которыми изобилвала атмосфера древней Земли.

В результате оказалось, что около 15% углерода перешло в органическую форму, и более того — 2% углерода оказались связанными в виде настоящих, реальных аминокислот. Также там выявились сахара, липиды и предшественники нуклеиновых кислот. С помощью такого имитатора эволюции удалось получить целых 22 аминокислоты. Таким образом, можно предположить, что при определенных условиях химическая эволюция (которую мы только констатировали, но не анализировали) подводит к началу эволюции генетической. Разумеется, отсюда еще очень далеко до объяснения первичной морфологии живого, возникновения «протоорганелл» и «протоклеток», что требует специальных исследований и даже — по мнению некоторых исследователей — оформления

отдельной научной дисциплины — протофизиологии<sup>8</sup>.

Для более тщательного анализа деталей генетического механизма следует также прояснить вопросы, связанные с так называемым С-парадоксом, эволюционной ролью горизонтального обмена генетической информацией, скрытой симметрией геномов, функционально-генетической дифференциацией ДНК, в частности, возможными функциями негенных ДНК, эволюционной ролью явления потери (утраты) генов, взаимосвязью между генетикой и морфологией организмов, микро- и макро-, геоцентрической и популяционноцентрической эволюцией, а также многое другое. Принципиальным также является вопрос, *насколько справедлива идея «генетического детерминизма»*, то есть, в каких пределах и в каких аспектах *генетический механизм* детерминирует *биологическую эволюцию*.

Отметим, что в генетическом механизме, как и в любом другом, действует феномен *«ловушки сложности»*. Одним из его проявлений, по нашим представлениям, является существование геномов организмов, более простых по своей общей организации, чем высшие животные и человек, но сложность генома которых превышает сложность человеческого. Так, например, геном пшеницы состоит примерно из 17 миллиардов пар нуклеотидных оснований, что примерно в 2,5 раза превышает соответствующий показатель генома человека (6,9 млрд пар). Некоторые виды амёб вообще отличаются колоссальной длиной генома. Так, геном амёбы *Amoeba dubia* состоит из 690 млрд. пар нуклеотидов.

Эти эффекты, как нам представляется, связаны с явлением *«паразитной сложности»* (см. формулы (17)–(18), состоящим в том, что в полной величине сложности механизма эволюции может существовать весьма большая *«паразитная»* часть, не имеющая прямой эволюционной нагрузки. Ведь увеличение сложности является всего лишь *необходимым условием эволюции*.

В генетическом механизме материальными агентами *«паразитной сложности»*, возможно, служат так называемые *«мусорные»* ДНК. Таким образом, феноменология сложности предоставляет некую общую методику анализа эволюционных механизмов и стимулирует поиски *достаточных условий эволюции*.

Несмотря на то, что генетическая система в целом представляется весьма «неоптимизированной», носящей исторические следы различного рода «тупиков», избыточностей и т. п., есть основания утверждать, что эволюционный размер геномов исторически увеличивался, причем<sup>8</sup> Matveev, V.V. Comparison of fundamental physical properties of the model cells (protocells) and the living cells reveals the need in protophisiology. // International Journal of Astrobiology, (2017) 16(1), pp.97–104.

<sup>7</sup> Miller S. (May 1953). «A production of amino acids under possible primitive earth conditions». Science (New York, N.Y.) 117 (3046): 528–9. PMID 13056598. ; Miller S., Urey H. (July 1959). «Organic compound synthesis on the primitive earth». Science (New York, N.Y.) 130 (3370): 245–51. PMID 13668555.; Lazcano A, Bada JL (June 2003). «The 1953 Stanley L. Miller experiment: fifty years of prebiotic organic chemistry». Origins of life and evolution of the biosphere : the journal of the International Society for the Study of the Origin of Life 33 (3): 235–42. PMID 14515862

ускоренными темпами<sup>9</sup>. При этом, как утверждается в процитированной статье, существует связь между уровнем организации и минимальным размером генома представителей этого уровня — но не для всех живых организмов в целом, а только для конкретной эволюционной линии («эволюционного ряда»), ведущей от прокариот к млекопитающим. В этом эволюционном ряду тенденция к росту сложности организма проявляется наиболее ярко. В качестве меры объема генома в той или иной группе организмов используется минимальный геном, а не диапазон, не средние величины и не случайные виды. Внутриклеточные паразиты не рассматриваются, поскольку они используют гены хозяина, экономя собственные ресурсы. Именно минимальный геном в большой группе организмов может помочь приблизительно оценить объем необходимой (неизбыточной) генетической информации, обеспечивающей существование представителей таксона. Более точную оценку получить трудно, поскольку нет надежных способов отличить действительно ненужные участки ДНК от функционально значимых (например, от некодирующих последовательностей, выполняющих регуляторные функции).

Понятие эволюционного ряда в упомянутом исследовании является принципиальным — в силу того, что только в пределах данного ряда и возможен корректный расчет динамики сложности эволюционно обусловленной последовательности геномов. Это и понятно, поскольку именно в пределах эволюционного ряда процессы эволюции наиболее эксплицитно связаны причинно-следственной связью. Если же рассматривать генетическую эволюцию в целом, то расчет динамики сложности соответствующего механизма эволюции должен учитывать множество дополнительных факторов и процессов, определяющих отклонения в ту или иную сторону от анонсированной нами обобщенной динамики механизма эволюции.

Как результат, можно составить приблизительную — в рамках презумпции нулевого приближения — периодизацию этапов генетического механизма эволюции. В некоторых литературных источниках приводится следующая (неполная) периодизация:

- 1.5 млрд. лет назад — простейшие (длина генетического кода порядка  $10^6$  бит);
- 600 млн. лет назад — появление первых многоклеточных типа медуз и плоских червей с длиной генетического кода порядка  $10^7$  бит;
- примерно 300 млн. лет назад появляются первые предшественники насекомых; длина генетического кода возрастает до  $10^8$  бит;

— около 100 млн. лет назад появляются первые птицы и млекопитающие с длиной генетического кода порядка  $10^9$  бит.

Если отложить соответствующие точки на графике в логарифмическом масштабе, то можно увидеть, что сложность (длина кода) растет по экспоненте, увеличиваясь примерно на порядок за 200 млн. лет, что дает среднее время удвоения объема генетической информации за этот период в 65 млн. лет. В общем, темп эволюции после появления механизма обмена генетической информацией увеличился практически в 10 раз! Однако, как отмечалось выше, не все так просто.

Во-первых, данные, записанные в генетическом коде, имеют довольно большую избыточность. Например, информацию, содержащуюся в генетическом коде человека, можно сжать примерно в 10 раз с помощью стандартного архиватора. Выше мы приводили примеры сравнительно простых организмов, живущих на Земле и обладающих генетическим кодом, длина которого значительно превышает длину генома человека. Значит, если предположить, что только длина генетического кода является определяющей при оценке степени эволюции, то можно легко зайти в тупик. Поэтому для объяснения деталей эволюционной динамики необходимо привлекать представления об эволюционных рядах, механизмах паразитной сложности, сопоставляя упомянутым механизмам соответствующие материальные агенты и процессы. При этом, в рамках генетического механизма эволюции, следует анализировать пределы возможностей данной эволюционной динамики.

Поэтому отметим, что уже со времен зарождения первых многоклеточных, появился и стал постепенно развиваться принципиально иной механизм усложнения биологических систем, основанный на использовании нервных клеток. Он позволяет переложить часть функций эволюции и адаптации организма с генетического уровня соответствующего биологического вида на нейронный уровень. Упрощенная (согласно «презумпции нулевого приближения») картина эволюции данного механизма была приведена в первой части. Но, проанализировав детальнее эволюционную динамику нейронного механизма, мы обнаружим и в нем эффекты, аналогичные описанным выше особенностям генетического механизма («ловушки сложности», «паразитная сложность»...).

Аналогичное поведение может быть обнаружено и в динамике других механизмов эволюции. Например, рост численности населения, перестав быть эволюционным фактором, теперь вносит вклад в основном в рост паразитной сложности мировой системы, как ни прискорбно это нам сознавать. Отмеченные аспекты мы намереваемся обсудить в других работах. А сейчас обратимся к анализу новейших тенденций финансово-информационно-сетевого механизма эволюции и выводам, которые из него последуют.

<sup>9</sup> А. В. Марков, В. А. Анисимов, А. В. Коротаев. Взаимосвязь размера генома и сложности организма в эволюционном ряду от прокариот к млекопитающим // Палеонтологический журнал. №4, 2010. Стр. 3–14. Полный текст — PDF, 207 Кб.

### Новейшие тенденции в развитии финансово-информационно-сетевого механизма. Апофеоз сетевой эволюции. Новые кризисы

Напомним, что у нас остался непрокомментированным последний – 16-й пункт из Таблицы 3. «Краткая хронология денег». Его мы отнесли к 2008 году и связали с ним следующие события: Финансовый кризис 2008 года. Появление Blockchain и Bitcoin.

Вообще-то, многие относят начало последнего глобального финансового кризиса к 2007 году и считают, что он начался с ипотечного кризиса в США, банкротства банков и падения цен на акции, проложив путь мировому экономическому кризису (который иногда также называют «великой рецессией»).

Проблемам, связанным с анализом причин данного кризиса, посвящено очень много публикаций; здесь мы в основном будем следовать материалам, размещённым на сайте<sup>10</sup>.

Излагая истоки кризиса, большинство аналитиков сходятся во мнении о его сугубо финансовом характере. Среди причин выделяют либерализацию кредитно-финансовой сферы, дерегулирование международных потоков капитала, недооценку рисков и чрезмерную опору банковских институтов на привлеченные средства в годы, предшествовавшие кризису. То есть кризис интерпретируется именно как финансовый, возникший на рынке ипотечного кредитования США и по цепочке распространившийся на другие сегменты финансовой системы и на реальную экономику.

Практически к аналогичному выводу пришла и созданная по решению президента США Б. Обамы специальная комиссия американского конгресса по расследованию причин кризиса 2008 – 2009 годов. Её итоговый отчет, обнародованный в январе 2011 года, утверждал, что кризис спровоцировали следующие факторы: провалы в финансовом регулировании, нарушения в области корпоративного управления, приведшие к чрезмерным рискам; чересчур высокая задолженность домохозяйств; широкое распространение «экзотических» ценных бумаг (деривативов), рост нерегулируемой «теневой» банковской системы.

Таким образом, вину возлагают на банкиров, финансовых регуляторов, а также на политиков. Банки брали на себя слишком большие риски, в то время как регулирующие органы не принимали должных мер, чтобы этого избежать. Обвинения были выдвинуты и в отношении бывшего главы ФРС Алана Гринспена в том, что он «не смог воспрепятствовать увеличению объема «токсичных» ипотечных кредитов, а также за насаждение идеи о том, что финансовые институты вполне могут регулировать себя самостоятельно».

В целом среди сторонников сугубо финансовой

природы кризиса можно выделить три основные точки зрения. В рамках первой причины кризиса озвучивают бесконтрольное использование Соединенными Штатами (и, значит, ФРС) статуса эмитента основной мировой резервной валюты. Согласно второй причине предпосылки кризиса следует искать в кредитных ловушках «общества потребления». Сторонники третьей точки зрения акцентируют внимание на бесконтрольном развитии финансовых рынков.

В подобных интерпретациях отражаются те важные качественные изменения, которые произошли в экономике индустриальных центров на протяжении последних десятилетий. Они связаны с перемещением производства стандартной и массовой промышленной продукции в быстроразвивающиеся страны Китая, Индии, Бразилию и др. В то время как структура производства в ведущих экономиках мира все более разворачивалась в сторону сферы услуг. Так, например, в США доля отраслей материальной сферы в ВВП сократилась с 40 процентов в начале 1950-х до 20 процентов в начале 2000-х годов.

Заметно вырос удельный вес финансовых рынков. Их растущее влияние сопровождалось массивным накоплением финансовых активов и внедрением целого ряда институциональных инноваций, предопределивших увеличение уровней задолженности практически всех секторов экономики. Виртуальная экономика становилась все более привлекательной для вложения средств по сравнению с реальными производственными активами. Доля финансового сектора в США в совокупных корпоративных прибылях увеличилась с 7,5 процента в 1983 до 40 процентов в 2007 году.

Глобальные финансовые операции с денежной эмиссией, обменными курсами и кредитными сделками стали в несколько раз превышать размеры реальной экономики. Проблему усугубил массовый запуск в оборот через многоступенчатую цепь деривативов – по мнению экспертов ЮНКТАД, «весьма сомнительных инструментов с точки зрения их вклада в рост общественного благосостояния». Финансовая составляющая приобрела самодовлеющее значение и фактически потеряла связь с реальной экономикой.

С учетом этих факторов, утрата или даже ослабление контроля за процессами в финансовой сфере не могли не привести к очередному обвалу на фондовых и кредитных площадках. По мнению Алана Гринспена, в этих условиях «если бы секьюритизированные американские низкокачественные кредиты не оказались слабым звеном глобальной финансовой системы, то его роль сыграл бы какой-нибудь другой финансовый продукт или рынок».

Однако выдвигая на первый план при объяснении причин возникшей турбулентности фактор «неэффективного контроля», упускается из виду, что финансовая компонента является лишь одним

<sup>10</sup> <http://svom.info/entry/311-globalnyj-finansovo-ekonomicheskij-krizis/>. Н.Холодков. Глобальный финансово-экономический кризис 2008-2009 годов.



из системных элементов глобальной экономики, взявшей старт еще в 1990-е годы. Ее главными составляющими стали дерегулирование и либерализация. Именно они рассматривались в качестве основных инструментов управления хозяйственной жизнью во всех ее проявлениях. В этом контексте снижение уровня контроля за функционированием финансового рынка стало, по существу, лишь отражением или следствием изъянов модели глобальной экономики и ее ведущих сегментов в лице США, Западной Европы и Японии, которые во многом определяли основные контуры, идеологические и геополитические параметры мирового развития.

Не случайным представляется и то, что по мере углубления рецессии обозначилась более широкая трактовка возникших в мировом хозяйстве аномалий. На сегодняшний день многие авторитетные представители политических, экономических и научных кругов сходятся во мнении о наличии целого ряда причин и факторов возникновения столь масштабных перекосов в мировой экономике. Как отмечают американские исследователи К. Рогоффи и К. Рейнхарт: «серьезные финансовые кризисы редко случаются изолированно от других событий. Они являются скорее "не спусковыми крючками спада", а чаще механизмами его усиления».

Формы проявления последнего кризиса, его продолжительность и связанные с ним, по выражению Кристин Логард, «сдвиги тектонических платформ в глобальной экономике» дают основание полагать, что его истоки не носят изначально финансового характера. Не являются они, вопреки мнению МВФ и Всемирного банка (ВБ), лишь следствием отсутствия эффективного регулирования рынка и надзора за кредитными организациями. Глобальные диспропорции возникли не в последние годы. Они связаны с превалирующими тенденциями в эволюции мировой экономики, итогами ее развития на протяжении последних десятилетий.

Мы привели здесь столь большой отрывок для того, чтобы показать, что стандартная экономическая наука, оперируя огромным числом факторов и параметров, не в состоянии объяснить действительные причины данного кризиса. В этой связи приведем высказывание экспертов такой авторитетной в международных экономических кругах организации, как Экономическая комиссия ООН для стран Латинской Америки и Карибского бассейна. По их мнению, «кризис не является лишь выражением слабости финансового регулирования, ни результатом морального кризиса, вызванного жадностью и алчностью. Кризис стал отражением конца модели развития и открывает двери для дискуссий о дальнейших путях социально-экономического прогресса»<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> Напомним, кстати, наше высказывание из первой части данной работы: «Общей особенностью этих кризисных явлений является их кажущаяся немотивированность. По крайней мере,

Что касается именно данного кризиса, то мы убеждены, что он носит действительно глобальный характер, затрагивающий наиболее глубокие основания мирового порядка, а надежды на то, что достаточно немного «подправить» Мировую Финансовую Систему или даже сменить её «модель», чтобы снова всё «заработало», выглядят достаточно эфемерными. Нам представляется, что в рамках традиционных экономических парадигм данная задача неразрешима; более того, она неразрешима в рамках вообще любых экономических парадигм.

Мы уверены, что вполне адекватные средства для объяснения причин мирового финансово-экономического кризиса 2008 года предоставляет эволюционная концепция, изложенная в данной работе. Напомним, что в разделе «Деньги и эволюция человека (в поисках параметра эволюции. Продолжение)» мы определили понятие паразитной сложности  $C_{parasite}$  по формуле (17) и параметра эффективности ( $\sigma$ -фактора и уменьшить  $C_{parasite}$ ? Был сделан вывод о том, что отмена «Золотого стандарта» стала одной из главных причин неограниченного роста члена  $C_{parasite}$ : «который только имитировал эволюцию, по сути, не имея к ней никакого отношения». Для преодоления этого дисбаланса предлагалось разработать что-то вроде аналога «Золотого стандарта», только в новой ипостаси, согласованной с реалиями информационно-сетевой эпохи.

Однако, мировая система, действуя спонтанно и бессознательно, методом «проб и ошибок», кажется, сама нашла некий вариант — не то что преодоления, а хотя бы борьбы — с паразитной сложностью Мировой Финансовой Системы, приводящей к глобальным кризисам. Создается впечатление, что в системе самопроизвольно зародился некий эквивалент, по сути — паллиатив "золотого стандарта", которым явились технология Blockchain и «криптовалюты», в первую очередь, Bitcoin. Возникновение технологии Blockchain и «криптовалют», главным образом, Bitcoin, по нашему мнению, стало спонтанной реакцией системы на неконтролируемый рост  $C_{parasite}$ . Bitcoin эмулирует некоторые свойства золота и в этом смысле может претендовать на роль фактора, уменьшающего паразитную сложность  $C_{parasite}$ . Полагаем, что при разработке аналогов «золотого стандарта» и вообще — мер по увеличению  $\sigma$ -фактора и снижению паразитной сложности необходимо учитывать опыт Blockchain и Bitcoin. В последнее время появляется

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. Создается впечатление, что мир вступил в эпоху глобальной нестабильности, причем последняя как бы «заложена» в его конструкцию».

множество публикаций, посвященных применению технологии Blockchain в различных областях финансовой сферы (и не только)<sup>12</sup>. Чрезвычайную активность в данном направлении демонстрирует (что естественно) и интернет<sup>13</sup>. Так или иначе, но появление на сцене «частных денег» — очень показательный и неприятный симптом для Мировой Финансовой Пирамиды, основанной на долларе.

Нам представляется, что Мировая Финансовая Пирамида уже прошла свой эволюционный пик (то есть перестала быть эволюционным фактором) и уверенно дрейфует в критическую область.

Всё чаще появляются публикации о закате эпохи доллара, о кризисе доллара как главной мировой резервной валюте. Приводятся данные о выводе тех или иных активов из долларовой зоны<sup>14</sup>.

Автор признается, что он не обладает вполне авторитетными источниками информации по данному вопросу. Но постоянная критика МВФ и ВБ действительно имеет место, а создание Нового Банка Развития (НБР) БРИКС является совершенно определенным симптомом кризиса мировых финансовых институтов, основанных на долларе.

#### **Возможности для преодоления современных мировых кризисов, имеющих эволюционное происхождение**

Как мы отмечали выше, основным противоречием современной эпохи является необходимость выполнения двух противоположных условий:

а) возрастания сложности мировой системы, как необходимого условия, обеспечивающего её эволюцию;

б) уменьшения той же самой сложности — для обеспечения управляемости системой такой большой («экспоненциальной») сложности, которую приобрела «СЕТЬ СЕТЕЙ».

Очевидно, что одновременное удовлетворение столь демонстративно противоречивых требований невозможно. Но и надеяться на то, что проблема «сама себя решит» также не приходится.

<sup>12</sup> Mills, David, Kathy Wang, Brendan Malone, Anjana Ravi, Jeff Marquardt, Clinton Chen, Anton Badev, Timothy Brezinski, Linda Fahy, Kimberley Liao, Vanessa Kar-genian, Max Ellithorpe, Wendy Ng, and Maria Baird (2016). "Distributed ledger technology in payments, clearing, and settlement," Finance and Economics Discussion Series 2016-095. Washington: Board of Governors of the Federal Reserve System, <https://doi.org/10.17016/FEDS.2016.095>.

<sup>13</sup> <https://www.amazon.com/Blockchain-Revolution-Technology-Changing-Business/dp/1101980133>; [https://www.huffingtonpost.com/don-tapscoff/five-myths-about-the-bloc\\_b\\_10105946.html](https://www.huffingtonpost.com/don-tapscoff/five-myths-about-the-bloc_b_10105946.html); <https://themoscowtimes.com/articles/eastern-europes-blockchain-revolution-59179>;

[http://blockchainday.org/?gclid=CjwKCAjw3\\_HOBRBaEiwAvLBbojg\\_Tqy0cf-pHubjy\\_9Eft4kQRaG7Znl3U19wlEzDwTVJIFY6RX4mBoCpOAAQAvD\\_BwE](http://blockchainday.org/?gclid=CjwKCAjw3_HOBRBaEiwAvLBbojg_Tqy0cf-pHubjy_9Eft4kQRaG7Znl3U19wlEzDwTVJIFY6RX4mBoCpOAAQAvD_BwE);

[https://www.meetup.com/CanadaBitcoin/events/237768286/?\\_cookie-check=Bld8Yey717\\_nVKrN](https://www.meetup.com/CanadaBitcoin/events/237768286/?_cookie-check=Bld8Yey717_nVKrN);

<https://medium.com/startup-grind/3-reasons-why-the-blockchain-revolution-is-finally-becoming-a-reality-63bdd90c89e2>

<sup>14</sup> <http://stockinfocus.ru/2015/05/27/rotshildy-i-rokfellery-vyvodyat-svoi-kapitaly-iz-ssha/>;

<https://www.youtube.com/watch?v=PPjazLoHcGY>

Поэтому необходимо предлагать какие-то меры. Например, «временно» пожертвовать эволюцией в пользу управляемости мировой системы. Или более тщательно подойти к анализу источников паразитной сложности, найти их и предпринять энергичные меры по их устранению. Или ещё что-то. Для начала хотя бы проанализировать изложенные нами соображения о причинах современных кризисов.

Однако автор вполне сознательно относится к тому, что мировые органы, осуществляющие глобальное управление (если таковые имеются), вовсе не обязаны знать нашу теорию, которая к тому же до сих пор даже не была опубликована. В то же время, анализ мировых процессов позволяет нам сделать вывод, что упомянутые органы, по всей видимости, руководствуются представлениями, если и не буквально совпадающими с нашими, то, по существу, весьма к ним близкими — если не по форме, то, во всяком случае, по содержанию. Более того, кажется, что они знают даже и нечто большее, с чем мы их и поздравляем. К такому выводу нас склоняют варианты преодоления глобальных кризисов, к анализу которых мы сейчас приступим.

#### **Вариант № 1. Управляемый хаос**

Термины «управляемый хаос», «контролируемая нестабильность» и подобные уже довольно давно стали привычными в лексиконе экспертов политологов, специалистов в области геополитики и глобалистики. Понятие хаоса перекочевало сюда из естествознания и математики, где связывается с именами таких ученых как А. Пуанкаре, Р. Том, Э. Лоренц, А. Колмогоров, В. Арнольд, Ю. Мозер, И. Пригожин и других, открывших область так называемого динамического хаоса, при котором поведение нелинейной системы выглядит случайным, несмотря на то, что оно определяется детерминистскими по своей форме законами. Поэтому в качестве синонима здесь часто используется название *детерминированный хаос*, причем оба термина считаются эквивалентными и указывают на существенное отличие хаоса как предмета научного изучения в синергетике и нелинейной динамике от *хаоса* в бытовом смысле, где оно обозначает просто отсутствие порядка. В науку понятие хаоса проникло из древнейших мифологических представлений донаучной космогонии, обозначавших этим словом изначально бесформенную и беспорядочную смесь материи и пространства. Описанное впервые Гесиодом в «Теогонии», это понятие представляло первичное состояние мира до появления чего бы то ни было («первобытный хаос»). Зачастую оно использовалось и для обозначения потустороннего мира (Тартара). И вот в новейшей истории оно вышло на сцену в качестве концепта социальной феноменологии, присвоив себе формулу «управляемого хаоса».

Доктрина «управляемого хаоса» была разработана в США. В число ее авторов обычно включают

Збигнева Бжезинского (автор книги «Великая шахматная доска: господство Америки и её геостратегические императивы»), Джина Шарпа (автор книги «От диктатуры к демократии») и Стивена Манна, опубликовавшего в 1992 году в журнале Национального военного колледжа в Вашингтоне работу «Теория хаоса и стратегическая мысль». Все они имеют отношение к «цветным революциям» в странах бывшего СССР, Югославии, а затем — в Египте, Тунисе, Ливии, Сирии, а также в постсоветских странах (Украине, Грузии, Киргизии, ...). Основные положения доктрины «управляемого хаоса» сводятся к следующему:

- объединение в нужный момент и на требуемый период разрозненных политических сил, вступающих против существующего законного правительства;
- подрыв уверенности лидеров страны в своих силах и в лояльности силовых структур;
- прямая дестабилизация обстановки в стране, поощрение настроений протеста с привлечением криминальных элементов с целью посеять панику и недоверие к правительству;
- организация смены власти путем военного мятежа, «демократических» выборов или другим путем.

В основу организации управляемого хаоса положена идея перестройки массового сознания и мировоззрения посредством информационных и социокультурных технологий (в частности, так называемых «Окон Овертона»), которые через внедрение культа «новых стереотипов» разрушают предыдущую социально-культурную парадигму, а также способность к сопротивлению и самоорганизации.

По поводу доктрины «управляемого хаоса» в глобальной политике различными авторами написано очень большое число публикаций. Как правило, выделяют две основные (и, заметим, противоположные) группы её целей, авторство и организацию которых обычно приписывают США: а) продвижение демократии туда, где (по мнению «продвигателей») её не хватает или она не такая как нужно; б) борьба за мировое господство.

Мы не будем здесь обсуждать различные взгляды на сущность доктрины «управляемого хаоса», равно как и дискутировать по поводу её целей, сформулированных таким образом. Разберемся, как это всё выглядит с точки зрения нашего подхода, основанного на теории сложности.

Для начала обратимся к некоей аналогии из совершенно другой области, а именно — к опыту проектировщиков сложных микроэлектронных систем. Как известно, при создании достаточно сложных микроэлектронных устройств очень часто возникают явления нестабильности их параметров, с которыми приходится бороться. Методы этой борьбы весьма разнообразны. В частности, как отмечается авторами одной из работ на данную

тему<sup>15</sup>: «Еще одним приемом, позволяющим улучшить параметры микроэлектронных систем на кристалле, является подмешивание шума на вход аналогового интерфейса» (выделение наше: В. Ш.).

Этот пример нам представляется весьма поучительным. Мы полагаем, что важной, сущностной (хотя и неявной) причиной практики «управляемого хаоса» является невозможность эффективного управления мировой системой, приблизившейся к зоне экспоненциального роста своей сложности. С этой позиции приходится прибегать к своеобразному приёму «подмешивания шума на вход системы», а доктрина «управляемого хаоса» при этом может быть сформулирована следующим образом: в мировую систему необходимо время от времени вводить «квазислучайные» возмущения (аналог «шума») в надежде на то, что в результате их действия эта система перестроится, ее параметры стабилизируются и станет возможным её дальнейшее функционирование.

Автор далёк от мысли, что борьба со сложностью представляет собой единственную причину практики управляемого хаоса. Несомненно, что и другие аспекты, в частности, упомянутые выше борьба за демократию и мировое господство, также имеют место. Однако, главной мы считаем именно борьбу со всё возрастающей мировой сложностью, которая неумолимо «выталкивает» мировую систему в зону неуправляемости и реально угрожает мировому порядку. Позитивным моментом такой интерпретации «управляемого хаоса» служит то, что в данном случае причины критических явлений определяются через посредство объективных процессов, а роль субъективных факторов минимизируется.

Доктрина и практика «управляемого хаоса» таким образом превращается в средство разрешения конфликта между желанием (и необходимостью) получения «долларовой ренты» через механизмы Мировой Финансовой Пирамиды, о которой говорилось выше, и невозможностью однопараметрического управления глобальной финансовой сетью. Одновременно они выполняют («елико можуху») и роль стабилизатора мирового порядка.

В то же время следует признать, что «управляемый хаос», по-видимому, не является хорошим решением проблемы и стабилизация мирового порядка удаётся ему всё хуже. Его средства и приемы (такие как: «Петля Анаконды», культивирование зон мировой нестабильности (Ближневосточный котел», «Балканский котел», «Кавказский котел» и т. д.), «цветные революции», «майданы», «арабская весна» и т. п.) весьма плохо управляемы уже вследствие своей природы и поэтому чреваты непредсказуемыми последствиями. Среди этих последних не представляется невероятной даже перспектива

<sup>15</sup> В.А. Романов, И.Б. Галелюка. Методы совершенствования параметров микроэлектронных компонентов и анализ их эффективности с помощью виртуальных оценочных плат // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. 2006, № 5 134

глобальной катастрофы, которая делает бессмысленными все «принимаемые меры». Особенно опасным здесь является то, что упомянутая глобальная катастрофа может произойти вполне случайно — в результате действия так называемого «человеческого фактора».

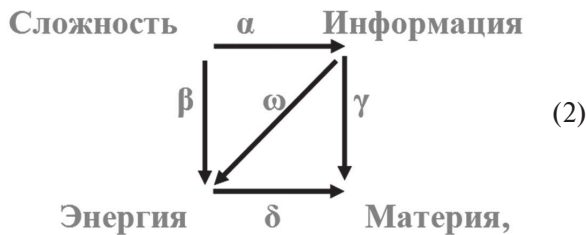
**Вариант № 2. Модификация и трансформация МФС (доктрина «управляемой сложности»)**

Анализ формул (17) – (18) предоставляет еще один вариант для борьбы с неэволюционной сложностью. Этот вариант, хотя и не гарантирует полного решения проблем эволюционного кризиса, в принципе способен значительно снизить неконтролируемый рост паразитной сложности и предоставить некий выигрыш времени для поиска более кардинальных подходов.

В силу глобального характера формул (17) – (18) этот вариант, к сожалению, не имеет локальных решений. Данное обстоятельство предопределяет необходимость серьезной модификации всей Мировой Финансовой Системы.

В частности, представляется весьма насущной необходимость «привязки» мировых резервных валют и, в первую очередь — доллара, к реальным «реперным» материальным объектам и процессам. Это означает, что должны быть разработаны некие «постмодернистские» аналоги «Золотого Стандарта» (в частности, основанные на далеко идущем обобщении и развитии Blockchain-технологий, криптовалют, о которых говорилось выше), а также способы их имплементации в МФС.

В более общей постановке сказанное предполагает глубокий анализ и учет системных отношений в квартете «сложность — информация — энергия — материя», играющих ключевую роль в финансово-информационно-сетевом механизме эволюции (а также во всех иных), что мы формализуем в виде следующего «концептуально-эволюционного квадрата»:



где диаграмма предполагается коммутативной:

$$\gamma \circ \alpha = \delta \circ \beta; \omega \circ \alpha = \beta; \delta \circ \omega = \gamma.$$

Таким образом, в силу открытого характера мировой системы отмеченная выше модификация не может ограничиваться только финансовой областью, а с необходимостью требует рассмотрения системы в целом. Собственно, изложенный подход и предполагает именно целостный характер анализа финансово-информационно-сетевого механизма и МФС.

Этот вариант мы обозначаем как «доктрину управляемой сложности». Отметим, что её

эффективная реализация вряд ли возможна без согласия и сотрудничества глобальных мировых игроков, интересы и стремления которых весьма противоречивы. Поэтому автор не очень высоко оценивает шансы данного варианта на успех. Разве что, системный ответ на кризисные явления станет некоей спонтанной объективной реакцией глобальной системы, не зависящей от воли упомянутых ключевых игроков, неожиданной для них и практически недоступной для имеющихся в их распоряжении средств воздействия. Либо, в силу кризисного развития событий, возникнет осознание необходимости коллективных, согласованных действий.

**Вариант № 3. Ограничение целостности МФС**

Ограничение целостности системы является стандартным методом понижения сложности. Сущность метода можно пояснить на следующей простой модели. Допустим, имеется некая система, состоящая из  $N$  различных объектов. Число парных связей между объектами системы равняется числу сочетаний из  $N$  элементов по 2:

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

Число тройных связей, соответственно,  $C_N^3 = \frac{N(N-1)(N-2)}{3!}$ ; число  $k$ -арных связей:

$$C_N^k = \frac{N(N-1)\dots(N-k+1)}{k!}; \dots$$

Сумма всех возможных связей между объектами

$$\sum_{k=1}^N \frac{N(N-1)\dots(N-k+1)}{k!} = 2^N, \text{ то есть растет экспоненциально с ростом } N$$

и представляет собой некий вариант так называемого комбинаторного взрыва. Если разделить систему, например, на две равные части (по  $N/2$  элементов в каждой, в случае четного  $N$ ), то общее число связей в ней уменьшится в 2 раза. Пропорционально уменьшится и сложность всей системы. Продолжение данного процесса будет сопровождаться соответственным понижением сложности системы.

Применительно к случаю мировой финансовой системы нечто подобное можно усмотреть в предложении о создании группировкой БРИКС самостоятельной глобальной финансовой системы, которая, по замыслу, должна функционировать параллельно долларовой. Понятно, что если двигаться по этому пути, то придется преодолеть целый ряд исключительно сложных проблем, важнейшая из которых — разработка принципов, порядка и практических институтов взаимодействия между двумя глобальными подсистемами. Учитывая изначально резко конкурентный, по сути — конфронтационный характер их взаимоотношений, можно предположить, что соглашения между такими двумя подсистемами будут достигаться с большим трудом и с еще большим трудом выполняться. Кроме того, следует учесть и некую антиэволюционность, заложенную в основание

метода ограничения целостности. Из изложенного следует, что реализация программы ограничения целостности в глобальном масштабе представляется весьма проблематичной, хотя некоторые её аспекты могут быть и вполне реалистичными. Как бы там ни было, на данный момент концепция ограничения целостности еще очень далека даже до сколько-нибудь детальной теоретической проработки. А организация в 2013 году странами-членами БРИКС (Бразилия, Россия, Индия, Китай и ЮАР) Нового банка развития (НБР) представляется нам не более, чем экспериментальной попыткой создания некоего противовеса системе МВФ — ВБ, которая, кажется, уже не удовлетворяет никого, но пока что не обрела никакой реальной альтернативы.

#### Вариант № 4. Космическая эволюция

Упомянем среди эволюционных альтернатив также и вариант, связанный с освоением человечеством Космоса и его космической экспансией. С точки зрения нашего подхода такая попытка теоретически предоставляет возможность вынесения эволюционных проблем в космическое пространство. При этом величина «пространственной плотности сложности» может быть значительно снижена и эволюция продолжена.

Однако следует учесть, что современная ракетная техника, основанная на известных типах реактивных двигателей, вряд ли подходит для завоевания Космоса. Пока что недостижимыми являются расстояния даже в единицы световых лет, в то время как необходимы надёжные методы преодоления расстояний в сотни тысяч и миллионы световых лет за время, сравнимое с человеческой жизнью. Принципиальные ограничения теории относительности на скорость перемещения материальных тел в пространстве, сразу же передвигают идею завоевания Космоса в область научной фантастики. Для того, чтобы практически подойти к решению данной проблемы, необходимы гораздо более фундаментальные знания о природе пространства-времени, устройстве нашей Галактики и Вселенной в целом, чем те, которыми человечество располагает в наше время.

#### Вариант № 5. Научно-технический прогресс. Квантовая информация и квантовая цивилизация

##### 5.1. Научно-технический прогресс

Все перечисленные выше методы являются весьма наукоёмкими и требуют для своей реализации проведения большого объема комплексных, трансдисциплинарных научных исследований. К сожалению, мы не обнаружили в этих исследованиях ориентации на эволюционные подходы, а полученные интерпретации современного состояния миропорядка и соответствующие теоретические выводы носят локальный по времени характер. Нам представляется, что убедительные выводы можно сделать, лишь рассматривая данные

в максимально широком временном диапазоне. Только тогда можно уловить наиболее общие тенденции развития и сделать адекватные и надёжные выводы. В табл. 1 мы приводим взятые из различных литературных источников данные об ускорении темпов эволюции на различных её участках, управляемых различными механизмами.

Таблица 1

Данные о периодах удвоения сложности для различных этапов и механизмов эволюции

ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ЭТАПЫ	ВРЕМЯ (-t, лет)	ПЕРИОД УДВОЕНИЯ СЛОЖНОСТИ T (лет)
<b>Генетический (от времени возникновения механизма обмена генетической информацией)</b>	<b>1,5 млрд.</b>	<b>65 млн.</b>
Нейронный	500 – 50 млн.	20 млн.
Коммуникационный	30 млн. – 100 тыс.	2 млн.
Каменный век (производственно-потребительский этап)	150 – 30 тыс.	50 тыс.
Производственно-потребительский, производственно-обменный этапы. Неолитическая революция	30 – 7 тыс.	20 тыс.
<b>ПРОИЗВОДСТВЕННО-ФИНАНСОВЫЙ +</b>		
Эпоха Древнего мира	7 тыс. – 0 тыс.	1 тыс.
Первая промышленная революция	250	80
Новое время	120	50
Информационное общество	43	30
Глобализация	25	15
Новейший сетцентризм	8	2
.....	.....	.....
<b>СИНГУЛЯРНОСТЬ (гипотеза)</b>	<b>(+30)</b>	<b>0</b>

Видим, что период удвоения сложности  $T$  уменьшился с 65 млн. лет (для участка генетической эволюции, когда возник механизм обмена генетической информацией – примерно 1,5 млрд. лет тому назад), до 2 лет в наше время (на современном участке финансово-информационно-сетевых механизмов). Таким образом, темп эволюции за этот период увеличился более, чем в 30 млн. раз!

Мы, разумеется, не можем утверждать, что это был непрерывный гладкий рост – точность данных не позволяет сделать такое утверждение; скорее всего это не так. Однако при всей приблизительности приведенных данных тенденция вырисовывается совершенно четкая: период удвоения сложности эволюционирующих систем за это время постоянно уменьшался, а обратная

ему величина, которую можно назвать темпом ускорения эволюции, неуклонно увеличивалась. Данный феномен вполне можно квалифицировать как закон ускорения эволюции. Причем в последние 40 – 45 лет темп ускорения носит экспоненциальный характер, а период удвоения сложности по той же экспоненте уменьшается.

Характерно, что источники ускорения эволюции совершенно отчетливо приобретают информационный характер и связаны со всё возрастающим темпом производства научно-технической информации, с одной стороны, и бурным развитием сетевой структуры мира (которая также является чрезвычайно наукоёмкой), с другой.

Таким образом, информационная, научно-техническая сфера в нашу эпоху стала определяющим фактором эволюции. Это, в частности, находит своё отражение в объемах и темпах роста информации, функционирующей в мировой системе (мы привели их в разделе «Оценка сложности финансово-информационно-сетевого механизма»).

Однако возникают вполне обоснованные сомнения, что такие большие объемы информации могут быть эффективно обработаны, а главное – адекватно восприняты и осознаны их реципиентами-адресатами в реальном времени современного бытия. Ведь психо-ментально-физиологическая природа человека, в том числе, его способность к восприятию и обработке информации вряд ли существенно изменилась со времен Адама. Упомянутый нами в первой части работы основной когнитивный тракт человека, а именно: «восприятие → ощущение → переживание → осознание → понимание → рефлексия → реакция»<sup>16</sup> продолжает так же действовать, как и тысячи лет назад, хотя, так сказать, информационный антураж цивилизации изменился коренным образом. Экспоненциальный рост информации<sup>17</sup> не сопровождается адекватным ростом человеческих возможностей по ее усвоению, а тем более эффективному использованию.

Таким образом, главное противоречие современной эпохи можно теперь сформулировать еще и так: *закон эволюции требует роста объемов информации, производимой и воспринимаемой человечеством, а общество, рассматриваемое как сумма индивидов и отношений между ними, в силу особенностей человеческой природы не в состоянии должным образом воспользоваться этими объемами и вынуждено ограничивать их производство, обработку и использование.* Эволюция и здесь «включает» механизмы своего торможения («антиэволюционные

факторы»), которые иногда проявляются в весьма драматических формах.

Насущная необходимость ответа на эти вызовы стимулировала новые подходы к оперированию сверхбольшими массивами информации и привела к концепции «Big Data» или «Больших данных», которые символически характеризуются как «три V», а именно: *Volume* («объем» – петабайты хранимых данных), *Velocity* («скорость» – получение данных, преобразование, загрузка, анализ, обработка и реакция в реальном времени) и *Variety* («разнообразие» – обработка структурированных, полуструктурированных и неструктурированных данных различных типов). В последнее время к приведенным «трем V» добавляют еще два: *Veracity* – достоверность данных, которой пользователи начали придавать все большее значение, и *Value* – ценность добытой и накопленной информации. Сейчас «Большие Данные» признаются вторым по значимости (после виртуализации) трендом в информационно-технологической инфраструктуре, который считается более весомым, чем даже энергосбережение и мониторинг.

Указанные особенности современного этапа развития Сети поставили проблему создания инструментов, способных «взять» на себя значительную часть функций основного когнитивного тракта человека. Таким образом проблема интеллектуализации Сети уверенно передвинулась на передний план актуальности.

Среди многих аспектов интеллектуализации здесь мы выделяем язык. Действительно, среди огромного количества определений искусственного интеллекта фигурирует и такое: «Искусственный интеллект – это форма индивидуализации технических систем, обладающая языковым статусом»<sup>18</sup>, а значит интеллект вообще можно считать формой индивидуализации систем, обладающей языковым статусом. Лингвистическое обеспечение Сети сейчас на самом деле играет роль ведущего фактора и основного интерфейса, обеспечивающего взаимодействие Человека с Сетью и Человека с Человеком через Сеть. Видимо, такая ситуация будет иметь место и в ближайшем будущем. Итак, приобретает все большую актуальность проблема объединения («интеграции») идей и технологий виртуализации, Больших данных и интеллектуализации (главным образом, через механизмы естественного языка).

Однако отмеченные тенденции в развитии информационных технологий несут в себе некие вызовы, если не угрозы для человеческой цивилизации. Это связано, в первую очередь, с неограниченным ростом интеллектуальных возможностей артефактов, создаваемых людьми для

<sup>16</sup> Palagin A.V., Shyrokov V.A. Principles of cognitive lexicography. //Informational theories & application. – 2000. – Vol.9. - № 2. – P. 43 – 51.

<sup>17</sup> Музяков С. Информационная среда и условия экспоненциального роста объема знаний в современном обществе/ С. И. Музяков // Власть. 2012. № 4. – С. 42-46.

<sup>18</sup> В. А. Широков. Феноменология лексикографических систем. – К. – «Наукова думка». – 2004. С. 20. (Признаемся, однако, что в данном определении неразъясненным остается понятие «языкового статуса». Как всегда, дьявол – в деталях!).

своих — как им кажется — целей. Таким образом, интеллект, который до сих пор представлялся исключительной прерогативой человека, начинает всё более определённо «диффундировать» в технологическую сферу. В связи с этим представляется весьма интересным проанализировать общую эволюцию техники и технологии на базе применяемого нами здесь сложностного подхода. Перенесём этот анализ в отдельную публикацию, а здесь сосредоточимся на актуальных проблемах эволюции и, главным образом, интеллектуализации техно- и инфосферы.

С появлением автоматических преобразователей информации в середине XX века резко возрос темп технического прогресса, что выразилось в ускорении темпа смены поколений техники и технологий. Формально это можно выразить в виде сравнительной динамики частот биологического и социального времени (соответствующие данные и определения приведены на сайте<sup>19</sup>). На рис. 1 показаны позаимствованные из этого сайта два графика: частота биологического и частота социального времени (частота смены поколений техники и технологий).

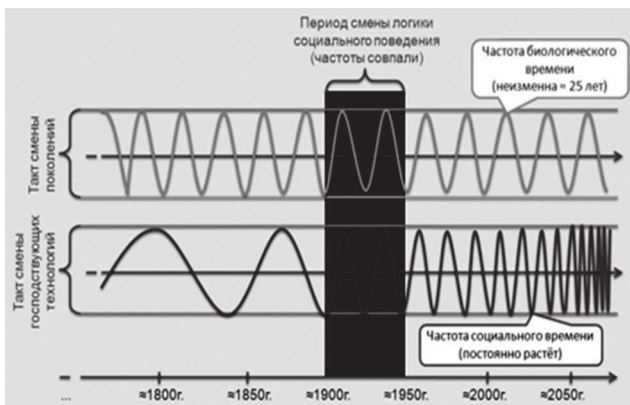


Рис. 1. Смена логики социального поведения

Итак, мы видим, что если первая практически не изменяется, то вторая сильно растёт и уже к середине XX века она обогнала биологическую частоту.

К тому же темп роста частоты социального поведения неуклонно возрастает, так что в обозримой перспективе можно ожидать событий, когда возможности техники, в том числе и в первую очередь — интеллектуальные, превысят аналогичные совокупные возможности человеческого рода. Эта альтернатива получила название гипотезы Технологической сингулярности<sup>20</sup>. Рей Курцвайль,

<sup>19</sup> [http://wiki-kob.ru/index.php/wiki?title=Смена\\_логики\\_социального\\_поведения&oldid=2024](http://wiki-kob.ru/index.php/wiki?title=Смена_логики_социального_поведения&oldid=2024)

<sup>20</sup> Vinge, Vernor. The Coming Technological Singularity: How to survive in the post-human era. In "Vision-21. Interdisciplinary Science and Engineering in the Era of Cyberspace". Proceedings of a symposium cosponsored by the NASA Lewis Research Centre and the Ohio Aerospace Institute and held in Westlake, Ohio. March 30-31, 1993. Пер. с англ. Олег Данилов/ В. Виндж. — Компьютерра-онлайн.; Ray Kurzweil. The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology. Viking. 2006. P.652.; Панов А.Д. Технологическая сингулярность, теорема Пенроуза об

один из «пророков» Технологической сингулярности в своей книге «The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology» утверждает, что наступит момент, по окончании которого машинное мышление перегонит биологическое, и технический прогресс станет настолько быстрым и сложным, что окажется недоступным человеческому пониманию. Техника и технология приобретут разум и будут не просто мыслить, но мыслить лучше людей. Это целиком и безвозвратно преобразует человечество: его тела, сознание, цивилизацию. По расчетам Курцвайля, человеческая цивилизация, какой мы ее знаем, закончится к 2045 году.

Разумеется, такой разворот событий окажет (и уже оказывает влияние) на производство, потребление, образ жизни, социальную психологию и вообще на все сферы жизнедеятельности общества. Цифровая экономика, «интернет вещей», набирающая всё более бурный темп роботизация и, так сказать, «смартизация»<sup>21</sup> уже в ближайшей перспективе способны изменить до неузнаваемости цивилизационный антураж, в том числе и социальную структуру общества. Совершенно понятно, что нагрузка на научно-техническую сферу и, соответственно, её роль и ответственность будут неуклонно и быстро расти.

## 5.2. Квантовая информация и квантовая цивилизация

Анализ эволюционных альтернатив приводит к еще одной возможности. До сих пор мы исходили из предположения, что экспоненциальный режим эволюции является критическим и заканчивается катастрофой. Опыт развития современного общества тоже как будто дает основания для такого же вывода: экспоненциальный рост сложности уже породил множество кризисов, причем ситуация продолжает обостряться. Теме не менее, зададимся вопросом: не существует ли процессов, позволяющих обеспечить нормальное, «бескризисное» функционирование системы в условиях экспоненциального нарастания её сложности. Оказывается, что такие процессы есть и связаны они с квантовой информацией.

Что же такое квантовая информация? В последнее время квантовые представления и даже технологии, основанные на квантовых эффектах приобрели колоссальную популярность. Уже вполне привычными стали квантовая химия, квантовая биология и квантовая электроника. Лазеры — квантовые генераторы света — стали, практически, бытовым явлением. Всё большее распространение приобретает квантовая медицина и квантовая

искусственном интеллекте и квантовая природа сознания — URL: [http://www.intelros.ru/pdf/metafizika/2013\\_3/7.pdf](http://www.intelros.ru/pdf/metafizika/2013_3/7.pdf); Медведев Д.А. (2008) Сверхтехнологии и общество в XXI веке. Курс лекций [Видеолекция 10. Технологическая сингулярность] / Д.А. Медведев // Univertv.ru — Режим доступа: [http://univertv.ru/video/sociologiya/sverhtehnologii\\_i\\_obwestvo\\_v\\_21\\_veke/lekciya\\_10\\_tehnologicheskaya\\_singulyarnost/](http://univertv.ru/video/sociologiya/sverhtehnologii_i_obwestvo_v_21_veke/lekciya_10_tehnologicheskaya_singulyarnost/).

<sup>21</sup> От английского «smart» — умный (smart city, smart house, smart things, smart dust, ...).

фармакология<sup>22</sup>. Квантовые представления проникли даже в область психологии<sup>23</sup>, экономики<sup>24</sup> и лингвистики<sup>25</sup>.

И вот, наконец, квантовая информация.

Она открывает совершенно фантастические возможности в информационной сфере, вследствие чего вполне может претендовать на роль нового эволюционного фактора. Мы здесь не будем излагать основы квантовой информации — ограничимся только некоторыми основными фактами и дадим литературные ссылки. Начало квантовой информации связывают с так называемым парадоксом Эйнштейна-Подольского-Розена<sup>26</sup>. Длительное время этот парадокс не мог быть разрешен вследствие того, что отсутствовала соответствующая экспериментальная база. Лишь к концу 1990-х годов были поставлены необходимые эксперименты, в ходе которых были получены так называемые запутанные квантовые состояния, реализующие информационное дальное действие. Параллельно осуществлялись эксперименты с квантовой суперпозицией состояний, открывающей путь к достижению колоссального распараллеливания информационно-вычислительных процессов, принципиально недостижимого на классической элементной базе. С основными результатами по квантовой информации можно познакомиться в работах<sup>27</sup>.

Так или иначе, но было показано, что задачи моделирования квантовых расчетов требуют экспоненциального времени на классических компьютерах и полиномиального — на квантовых. Итак, квантовые вычислители в принципе способны решать задачи экспоненциальной сложности. С другой стороны, квантовая запутанность

позволяет осуществлять информационное взаимодействие со скоростью в сотни тысяч раз превышающей скорость света и так называемую квантовую телепортацию<sup>28</sup>.

Сведения о новых результатах в области квантовой информатики всё чаще появляются в Сети. Так, квантовый чип из четырех кубитов (квантовых битов), был представлен фирмой IBM в 2015 году. Та же IBM открыла доступ к облачному сервису квантовых вычислений «The IBM Quantum Experience». Канадская D-Wave Systems анонсировала выпуск коммерческой версии квантового компьютера четвертого поколения D-Wave 2000Q. Фирма также объявила первого покупателя нового устройства, которым стала специализирующаяся в области кибербезопасности компания TDS (Temporal Defense Systems). В 2016 году первая в России многоузловая квантовая сеть была запущена в Татарстане. Проект реализован учеными Казанского квантового центра КНИТУ-КАИ и Университета ИТМО на сети оператора связи ПАО «Таттелеком». В Китае до конца этого года планируется запустить квантовую сеть между Пекином и Шанхаем длиной порядка 2 тыс. км. А в США ведутся работы над квантовой сетью между Огайо и Вашингтоном протяженностью 650 км.

Можно утверждать, что информационные системы, сети и отдельные устройства, построенные на принципах квантовой информации, когда они достигнут должного уровня, коренным образом изменят технологическую базу современной цивилизации и предоставят эффективные средства для борьбы с проклятием эволюции — экспоненциальной сложностью.

Отметим, что квантовая информация, как нам представляется, коснется не только компьютеров и сетей, а составит основу для переустройства всего человеческого сообщества. Ведь недаром в последнее время всё активнее обсуждаются возможности и варианты более тесной интеграции мира людей и мира техники. В некотором пределе, связанном возможно и с упомянутой выше технологической сингулярностью, представляется возможной даже объединение человеческой и технотронной сущностей в едином когнитивном организме<sup>29</sup>. Имеется в виду, что в некоторой перспективе линии развития человеческого рода и мира техники и технологии пересекутся и возникнет нечто совершенно новое, как это символически изображено на рис. 2.

При всей кажущейся экстравагантности данного предположения, в свете достижений современной био-, нано- технологии, эволюционной медицины, когнитологии, нейронауки, квантовой лингвистики и информатики уже не кажутся чересчур фантастичными. Они аккумулируются

<sup>22</sup> Чекман И. С. Квантовая фармакология: стан, перспективи наукових досліджень, впровадження результатів у практичну фармацію / І. С. Чекман // Фармацевтичний журнал. - 2011. - № 2. - С. 43-48.

<sup>23</sup> Уилсон Роберт Антон. Квантовая психология: как работа Вашего мозга программирует Вас и Ваш мир ISBN: 5-9550-0841-1, 978-5-9550-0841-7. Янус.: 1998.

<sup>24</sup> Маслов В.П. Квантовая экономика. М.: Наука. 2006. ISBN 5-02-035772-3. 96 с.

<sup>25</sup> Eric S. Piotrowski, *Toward a Quantum Linguistics: Possibilities for Change in the Delta Zone*, 2000.

Широков В. А. Очерк основных принципов квантовой лингвистики. // Бионика интеллекта. — 2007. — № 1(66). — С. 25-32.

<sup>26</sup> Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // *Phys. Rev.* / G. D. Sprouse — American Physical Society, 1935. — Vol. 47, Iss. 10. — P. 777–780. — ISSN 0031-899X; 1536-6065 — doi:10.1103/PHYSREV.47.777

<sup>27</sup> Прескилл Дж. Квантовая информация и квантовые вычисления. Том 1. — М.—Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных исследований, 2008. — 464 с.; К. А. Валиев. Квантовая информатика. Компьютеры, связь и криптография. Вестник РАН, том 70, № 8, с. 688-695 (2000); С.И. Чивилихин. Квантовая информатика. Учебное пособие. Санкт-Петербург, 2007; C. Stapp, Henry P. “Quantum Nonlocality and the Description of Nature,” in James T. Cushing and Ernan McMullin, eds., *Philosophical Consequences of Quantum Theory* (Notre Dame: University of Notre Dame Press, 1989). Strehle, Susan. *Fiction in the Quantum Universe*. Chapel Hill: University of North Carolina Press, 1992.

<sup>28</sup> Последнее утверждение, по нашему мнению, нуждается в серьезном уточнении.

<sup>29</sup> В этом месте автор приносит свои извинения читателям за несколько довольно чересчур наукообразный и высокопарный стиль, навеянный пафосом излагаемого момента.



и развиваются в движении трансгуманизма, насчитывающего уже огромное число сторонников во всем мире (информацию о движении трансгуманистов можно почерпнуть из портала: Трансгуманизм<sup>30</sup>). Как утверждают адепты данного движения, возможно, эволюционные потенции человеческой природы уже приближаются к своему исчерпанию и на смену человеку придёт нечто совершенно новое...

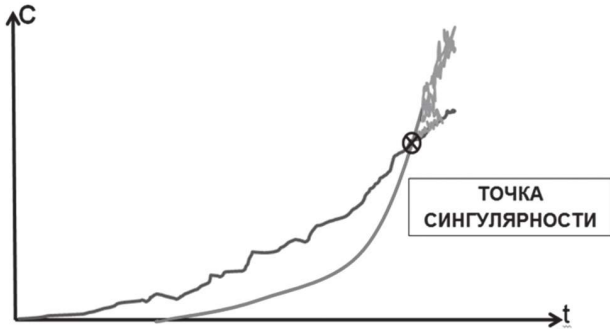


Рис. 2. Конвергенция антропогенного и артефактного субстрата в точке сингулярности

В этой связи автор не может не позволить себе маленькое удовольствие и привести цитату из книги Фридриха Ницше «Так говорил Заратустра»<sup>31</sup>:

«Я учу вас о Сверхчеловеке. Человек есть нечто, что должно преодолеть. Что сделали вы, дабы преодолеть его?

Доныне все существа создавали нечто, что выше их; вы же хотите стать отливом этой великой волны и скорее вернуться к зверям, чем преодолеть человека?

Что такое обезьяна по сравнению с человеком? Посмешище либо мучительный позор. И тем же самым должен быть человек для Сверхчеловека — посмешищем либо мучительным позором.

Вы совершили путь от червя до человека, но многое еще в вас — от червя. Когда-то были вы обезьянами, и даже теперь человек больше обезьяны, нежели иная из обезьян.

Даже мудрейший из вас есть нечто двусмысленное и неопределенно-двуполюсное, нечто среднее между тем, что растет из земли, и обманчивым призраком. Но разве велю я вам быть тем либо другим?

Слушайте, я учу вас о Сверхчеловеке!

Сверхчеловек — смысл земли. Пусть же и воля ваша скажет: *Да будет Сверхчеловек смыслом земли!*»

Таким вот замысловатым образом высказанное в поэтической форме более 100 лет тому назад пророчество Фридриха Ницше может в ближайшую эпоху найти своё совершенно неожиданное воплощение...

Квантовая информация приближает нас к наступлению квантовой цивилизации.

<sup>30</sup> <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%80%D1%82%D0%B0%D0%BB:%D0%A2%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%B3%D1%83%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%BC>

<sup>31</sup> Фридрих Ницше. Так говорил Заратустра. Книга для всех и ни для кого. Пер. В.В.Рынкевича, под ред. И.В.Розовой. — М.: «Интербук», 1990

## ЭПИЛОГ: VITA NOVA

В заключение приведем некоторые общие выводы из изложенного в двух частях нашей работы.

1. Эволюция является одним из основных свойств Мироздания.

2. Эволюция Мира осуществляется не непрерывно, а реализуясь в неких *дискретных* формах — «механизмах эволюции». Каждый механизм эволюции характеризуется определенным, специфичным для него комплексом материально выраженных признаков, позволяющих его индивидуализировать и выделить среди других механизмов. Однако все механизмы имеют некоторые общие свойства, что позволяет их типизировать и отнести к одному классу явлений, а именно — к классу «ЭВОЛЮЦИЯ»

3. Все механизмы имеют общую черту: разворачивание любого механизма эволюции приводит к усложнению эволюционирующей системы. Это означает, что в процессе темпоральной динамики конкретного механизма эволюции его сложность (оцениваемая величиной соответствующего количественного коррелята) возрастает. Данное утверждение формулируется в виде Основного закона — необходимого условия эволюции: «Сложность эволюционирующей системы всегда растет»

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

5. 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 обеспечить ее усложнение, и следовательно — продолжить процесс эволюции.

6. Эволюционная теория сложности дает вполне адекватное объяснение причин кризисов в современном мире.

7. В силу неконтролируемого возрастания сложности современного Финансово-информационно-сетевого механизма эволюции Мир все сильнее скатывается в глобальный кризис.

8. Этот кризис носит онтологический характер и не может быть разрешен путем паллиативов. Однако паллиативные меры могут замедлить сползание в кризис и предоставить время, необходимое для поиска и разработки принципиальных решений.

9. В данной работе, с позиций теории эволюционной сложности, проанализированы причины возникновения современных кризисов и приведены возможные варианты борьбы с ними.

10. Среди этих вариантов наиболее перспективными автору представляются варианты, связанные с управляемой сложностью, научно-техническими инновациями и квантовой информацией.

11. Автор обращает внимание на опасность, которую несёт неконтролируемое развитие критических явлений, подталкивающих мир к глобальной катастрофе.

12. Автор считает необходимым создание универсального международного трансдисциплинарного научно-исследовательского учреждения в данной области с целью организации исследований общей теории эволюции Мира и ее приложений.

Поступила в редколлегию 26.01.2018

УДК 519.62

Ivan Bozhko<sup>1</sup>, Grygorij Chetverykov<sup>2</sup>, Yaroslav Kolisnyk<sup>3</sup><sup>1</sup> Khavkiv National University of Radio Electronics,  
Kharkiv, Ukraine, ivan.bozhko@nure.ua<sup>2</sup>Khavkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, grigorij.chetverykov@nure.ua,  
University of Szczecin, Institute of Physics and Institute of Mathematics, chetvergg@gmail.com<sup>3</sup>Khavkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, yaroslav.kolisnyk@nure.ua

## THE Q# PROGRAMMING LANGUAGE INVESTIGATION

This work is the investigation of the current state of the existing tools for quantum computing, especially the Q# programming language as the most developed tool for this nowadays. Since quantum computing is one of the main research area today, the respective tools are being created. These tools should simplify the development of quantum programs, on the one hand, and provide some platform for testing and running them, on the other hand. So the authors investigated the currently available tools and provided the results in the article.

QUANTUM COMPUTING, QUANTUM COMPUTER, Q#, QUANTUM COMPUTING TOOLS, MICROSOFT QUANTUM DEVELOPMENT KIT

**Божко І.К., Четвериков Г.Г., Колісник Я.В. Дослідження мови програмування Q#.** Дана робота являє собою дослідження поточного стану існуючих інструментів квантових обчислень, особливо мови програмування Q# як найбільш розвинутого інструменту для цього в даний час. Оскільки квантові обчислення сьогодні є однією з основних областей досліджень, створюються відповідні інструменти. Вони покликані спростити розробку квантових програм, з одного боку, і надати платформу для тестування і запуску їх, з іншого боку. Тому автори дослідили наявні в даний час інструменти і представили результати в даній статті.

КВАНТОВІ ОБЧИСЛЕННЯ, КВАНТОВИЙ КОМП'ЮТЕР, Q#, ІНСТРУМЕНТИ КВАНТОВИХ ОБЧИСЛЕНЬ, MICROSOFT QUANTUM DEVELOPMENT KIT

**Божко И.К., Четвериков Г.Г., Колесник Я.В. Исследование языка программирования Q#.** Данная работа представляет исследование текущего состояния существующих инструментов квантовых вычислений, особенно языка программирования Q# как самого развитого инструмента для этого в настоящее время. Поскольку квантовые вычисления сегодня являются одной из основных областей исследований, создаются соответствующие инструменты. Они призваны упростить разработку квантовых программ, с одной стороны, и предоставит платформу для тестирования и запуска их, с другой стороны. Поэтому авторы исследовали имеющиеся в настоящее время инструменты и представили результаты в данной статье.

КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ, КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР, Q#, ИНСТРУМЕНТЫ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ, MICROSOFT QUANTUM DEVELOPMENT KIT

### Introduction

Quantum computing represents an alternative approach to automated computations using quantum computers.

Despite the development of research in this field today, for the first time, the idea of quantum computing was advanced by the Soviet mathematician Yu.I. Manin back in 1980 in his famous monograph “Computable and uncomputable” [1]. However, more interest in this type of calculation arose only in 1982, after the American theoretical physicist Richard Feynman noticed that not all quantum-mechanical operations can be accurately transferred to a classical computer and more efficiently carried out by quantum operations.

An additional relevance to the quantum computing problem was added by mathematician Peter Shore, who in 1994 proposed an algorithm that allows the expansion of a n-valued number to simple multipliers with polynomial complexity. On classical computers, this task is much more complex and does not allow you to get the result for a satisfactory time.

Since this task is the basis of many popular cryptographic algorithms (for example, RSA) [2], the creation of quantum computers may influence the security of the data exchange in the network, and after the appearance of a real prototype of a quantum computer, it can become a global security issue.

Consequently, quantum computing is relevant not only for scientific problems of quantum processes modeling, but also relevant to the world of information technology. In order to popularize them not only in the scientific world, but also among developers, tools are created to simplify the work with quantum algorithms, such as the programming language Q#, which is considered in this paper.

### 1. Existing quantum computing tools

Over the past few years, with the growing popularity of quantum computing research, tools and emulators of quantum computers have begun to appear that allow you to try calculations to practice. Here are some popular tools and their descriptions.

### 1.1. Microsoft Quantum Development Kit

Microsoft has released a preview version of Quantum Development Kit, which includes the new quantum programming language Q#, integration with the Visual Studio development environment, simulators that work with both the local system and their powerful Azure cloud platform, as well as libraries and code samples that can be used as constructive blocks.

### 1.2. IBM Quantum Experience

IBM has created an experimental quantum 5-qubit processor that is available to users through the Internet [2]. On the IBM Quantum Experience website, you can find a short tutorial that explains the basics of quantum computing and system usage instructions, the configuration of the queue access interfaces, a simulator that allows you to simulate their configuration before running it on the actual machine, and access to the machine itself that allows you to run the configuration and view the results.

### 1.3. Rigetti Forest

The Rigetti Forest package consists of the instructions based quantum language called Quil, an open Python library for building Quil programs called pyQuil, a quantum library called Grove, and a simulation environment called QVM (Quantum Virtual Machine). pyQuil and Grove are open source programs available on Github. Users can develop their applications using pyQuil and Grove on their own computer, and then transfer them to QVM for simulation through a web portal that is available to registered users.

### 1.4. ProjectQ

ProjectQ is an open source software for quantum computing, implemented in Python. This allows users to implement their quantum programs in Python using a powerful and intuitive syntax. ProjectQ can then broadcast these programs to any server part: a simulator that runs on a classic computer, or a quantum computer (for example, using IBM Quantum Experience). Other hardware platforms are currently not supported.

In addition to these tools, there are others such as Cirq, Quirk, QuTiP, but they are less powerful than those described above.

As can be seen from the description of existing solutions, most of them are complementary to existing programming languages (in particular, Python), but given the new paradigm of computations, this may cause difficulties in programming algorithms using these tools, therefore, a more flexible and powerful solution is a separate programming language, which currently only Microsoft offers.

Also, it is necessary to highlight the Intel solution with the existing experimental quantum computer, but it requires execution of queries to individual qubits through the API, which complicates its use.

## 2. The Q# language

As discussed above, one of the parts of Microsoft Quantum Development Kit is a Q# language specifically

designed for quantum computing. In terms of software engineering, this solution is most interesting as it allows abstracting from the paradigm of classical computing and classical programming languages and describing a quantum algorithm using a special syntax.

Consider the language Q# in more detail.

### 2.1. Computing model

According to official Microsoft documentation [4], a natural model for quantum computation is to treat the quantum computer as a coprocessor, similar to that used for GPUs, FPGAs, and other adjunct processors. The primary control logic runs classical code on a classical “host” computer. When appropriate and necessary, the host program can invoke a sub-program that runs on the adjunct processor. When the sub-program completes, the host program gets access to the sub-program’s results.

In this model, there are three levels of computation:

- Classical computation that reads input data, sets up the quantum computation, triggers the quantum computation, processes the results of the computation, and presents the results to the user.
- Quantum computation that happens directly in the quantum device and implements a quantum algorithm.
- Classical computation that is required by the quantum algorithm during its execution.

There is no intrinsic requirement that these three levels all be written in the same language. Indeed, quantum computation has somewhat different control structures and resource management needs than classical computation, so using a custom programming language allows common patterns in quantum algorithms to be expressed more naturally.

Keeping classical computations separate means that the quantum programming language may be very constrained. These constraints may allow better optimization or faster execution of the quantum algorithm.

Q# (Q-sharp) is a domain-specific programming language used for expressing quantum algorithms. It is to be used for writing sub-programs that execute on an adjunct quantum processor, under the control of a classical host program and computer.

Q# provides a small set of primitive types, along with two ways (arrays and tuples) for creating new, structured types. It supports a basic procedural model for writing programs, with loops and if/then statements. The top-level constructs in Q# are user defined types, operations, and functions.

### 2.2. Q# type system

The Q# language provides a small set of primitive types, as well as two methods (arrays and corrections) for creating new types of data (it means that the language have a bit more constraints than classical languages, which was made for optimization purposes). In general, the language usually supports a procedural conditional programming model (if -this) and cycles.

Let us consider the primitive data types which other types consist of:

- The `int` type represents a 64-bit signed (two's complement) integer.
- The `double` type represents a double-precision floating-point number.
- The `bool` type represents a Boolean value, either true or false.
- The `qubit` type represents a quantum bit or qubit. They are opaque to the user; the only operation possible with them, other than passing them to another operation, is to test for identity (equality). Ultimately, actions on Qubits are implemented by calling operations in the Q# standard library.

- The `Pauli` type represents an element of the single-qubit Pauli group. This type is used to denote the base operation for rotations and to specify the basis of a measurement. This type is a discriminated union with four possible values: `PauliI`, `PauliX`, `PauliY` and `PauliZ`.

- The `Result` type represents the result of a measurement. This type is a discriminated union with two possible values: `One` and `Zero`. `Zero` indicates that the +1 eigenvalue was measured; `One` indicates the -1 eigenvalue.

- The `Range` type represents a sequence of integers.
- The `String` type is a sequence of Unicode characters that is opaque to the user once created. This type is used to report messages to a classical host.

It is also necessary to note that having the type system described above means a set of reserved keywords: `true`, `false`, `PauliI`, `PauliX`, `PauliY`, `PauliZ`, `Zero` and `One`.

Outside of the primitive types, there are also another types we will consider now in more detail.

Given any valid Q# type 'T there is a type that represents an array of values of type 'T. This array type is represented as 'T[] for example, `Qubit[]` or `Int[][]`.

In the second example, note that this represents a potentially jagged array of arrays, and not a rectangular two-dimensional array. Q# does not include support for rectangular multi-dimensional arrays.

Given any valid Q# types 'T1, 'T2, 'T3, etc., there is a type that represents a tuple of values of types 'T1, 'T2, 'T3, etc., respectively. This tuple type is represented as ('T1, 'T2, 'T3, ...). Any number of types may be tupled together. The empty tuple, (), is equivalent to unit in F#.

It is possible to create arrays of tuples, tuples of arrays, tuples of sub-tuples, etc.

Tuple instances are immutable. Q# does not provide a mechanism to change the contents of a tuple once created.

It is also possible to create a singleton (single-element) tuple, ('T1), such as (5) or ([1;2;3]). However, Q# treats a singleton tuple as completely equivalent to a value of the enclosed type. That is, there is no difference between 5 and (5), or between 5 and (((5))), or between (5, (6)) and (5, 6).

This equivalence applies for all purposes, including assignment and expressions. It is just as valid to write (5)+3 as to write 5+3, and both expressions will evaluate to 8. We refer to this property as singleton tuple equivalence.

There is also a possibility for creating user-defined types. A Q# file may define a new named type based on a standard type. Any legal type may be used as the base for a user-defined type.

User-defined types may be used anywhere any other type may be used. In particular, it is possible to define an array of a user-defined type and to include a user-defined type as an element of a tuple type.

It is not possible to create recursive type structures. That is, the type that defines a user-defined type may not be a tuple type that includes an element of the user-defined type. More generally, user-defined types may not have cyclic dependencies on each other.

The mutability of instances of user-defined types is the same as the mutability of instances of the base type of the user-defined type. Specifically, instances of user-defined types based on tuples are immutable; instances of user-defined types based on arrays are potentially mutable.

Effectively, a user-defined type is a subtype of the base type. Thus, a value of a user-defined type may be used anywhere a value of the base type is expected. This is applied recursively.

For example, suppose type `IntPair` is a user-defined type with base type (`Int`, `Int`), and type `IntPair2` is a user-defined type with base type `IntPair`. A value of type `IntPair2` may be used anywhere a value of type `IntPair2`, `IntPair`, or (`Int`, `Int`) is expected. A value of type `IntPair` may be used anywhere a value of type `IntPair` or (`Int`, `Int`) is expected.

Different user-defined types based on the same base type are treated as distinct and unrelated types. In the previous example, if `IntPair3` is also a user-defined type with base type (`Int`, `Int`), then `IntPair` and `IntPair3` are unrelated and a value of one may not be used where a value of the other is expected.

A Q# operation is a quantum subroutine. That is, it is a callable routine that contains quantum operations.

A Q# function is a classical subroutine used within a quantum algorithm. It may contain classical code but no quantum operations. Functions may not allocate or borrow qubits, nor may they call operations. It is possible, however, to pass them operations or qubits for processing.

Together, operations and functions are known as callables.

All Q# callables are considered to take a single value as input and return a single value as output. Both the input and output values may be tuples. Callables that have no result return the empty tuple, (); callables that have no input take the empty tuple as input.

The basic signature for any callable is written as ('Tinput => 'Tresult) or ('Tinput -> 'Tresult), where

both 'Tinput and 'Tresult are type specifiers. The first form, with =>, is used for operations; the second form, with ->, for functions. For example, ((Qubit, Pauli) => Result) represents the signature for a possible single-qubit measurement operation.

Function types are completely specified by their signature. For example, a function that computes the sine of an angle would have type (Double -> Double).

Operations – but not functions – may allow the application of one or more functors. Functors are meta-operations that generate a variant of a base operation.

Operation types are specified by their signature and the list of functors they support. For example, the Pauli X operation has type (Qubit => ()) : Adjoint, Controlled). An operation type that does not support any functors is specified by its signature alone, with no trailing .:

Callable signatures may contain type parameters. Type parameters are indicated by a symbol prefixed by a single quote; for example, 'A is a legal type parameter. Type-parameterized functions and operations are similar to generic functions in many programming languages, but Q# does not provide a full generic type/function capability.

A type parameter may appear more than once in a single signature. For example, a function that applies another function to each element of an array and returns the collected results would have signature (('A[], 'A->'A) -> 'A[]). Similarly, a function that returns the composition of two operations might have signature ((('A=>'B), ('B=>'C)) -> ('A=>'C)).

When invoking a type-parameterized callable, all arguments that have the same type parameter must be of the same type, or be compatible with the same type; that is.

Q# does not provide a mechanism for constraining the possible types that might be substituted for a type parameter. Thus, type parameters are primarily useful for functions on arrays and for composing callables.

An operation with additional functors supported may be used anywhere an operation with fewer functors but the same signature is expected. For instance, an operation of type (Qubit=>():Adjoint) may be used anywhere an operation of type (Qubit=>()) is expected.

Q# is covariant with respect to callable return types: a callable that returns a type 'A is compatible with a callable with the same input type and a result type that 'A is compatible with.

Q# is contravariant with respect to input types: a callable that takes a type 'A as input is compatible with a callable with the same result type and an input type that is compatible with 'A.

A functor in Q# is a factory that defines a new operation from another operation. Functors have access to the implementation of the base operation when defining the implementation of the new operation. Thus, functors can perform more complex functions than traditional higher-level functions.

A functor is used by applying it to an operation, returning a new operation. For example, the operation that results from applying the Adjoint functor to the Y operation is written as (Adjoint Y). The new operation may then be invoked like any other operation. Thus, (Adjoint Y)(q1) applies the adjoint functor to the Yoperation to generate a new operation, and applies that new operation to q1. Similarly, (Controlled X) (controls, target).

The two standard functors in Q# are Adjoint and Controlled.

In quantum computing, the adjoint of an operation is the complex conjugate transpose of the operation. For operations that implement a unitary operator, the adjoint is the inverse of the operation. For a simple operation that just invokes a sequence of other unitary operations on a set of qubits, the adjoint may be computed by applying the adjoints of the sub-operations on the same qubits, in the reverse sequence.

Given an operation expression, a new operation expression may be formed using the Adjoint functor, with the base operation expression enclosed in parentheses, ( and ). The new operation has the same signature and type as the base operation. In particular, the new operation also allows Adjoint, and will allow Controlled if and only if the base operation did.

For instance, (Adjoint QFT) designates the adjoint of the QFT operation.

The controlled version of an operation is a new operation that effectively applies the base operation only if all of the control qubits are in a specified state. If the control qubits are in superposition, then the base operation is applied coherently to the appropriate part of the superposition. Thus, controlled operations are often used to generate entanglement.

In Q#, controlled versions always take an array of control qubits, and the specified state is always for all of the control qubits to be in the computational (PauliZ) One state,  $|1\rangle|1\rangle$ . Controlling based on other states may be achieved by applying the appropriate Clifford operations to the control qubits before the controlled operation, and then applying the inverses of the Cliffords after the controlled operation. For example, applying an Xoperation to a control qubit before and after a controlled operation will cause the operation to control on the Zero state ( $|0\rangle|0\rangle$ ) for that qubit; applying an H operation will control on the PauliX Zero state  $|+\rangle := (|0\rangle + |1\rangle) / \sqrt{2}$ ;  $|+\rangle := (|0\rangle + |1\rangle) / 2$  rather than the PauliZ Zero state.

Given an operation expression, a new operation expression may be formed using the Controlled functor, with the base operation expression enclosed in parentheses, ( and ). The signature of the new operation is based on the signature of the base operation. The result type is the same, but the input type is a two-tuple with a qubit array that holds the control qubit(s) as the first element and the arguments of the base operation as the second element. If the base operation took no

arguments, `()`, then the input type of the controlled version is just the array of control qubits. The new operation allows `Controlled`, and will allow `Adjoint` if and only if the base operation did.

If the base function took only a single argument, then singleton tuple equivalence will come into play here. For instance, `Controlled(X)` is the controlled version of the `X` operation. `X` has type `(Qubit => () : Adjoint, Controlled)`, so `Controlled(X)` has type `((Qubit[], (Qubit)) => () : Adjoint, Controlled)`; because of singleton tuple equivalence, this is the same as `((Qubit[], Qubit) => () : Adjoint, Controlled)`.

Similarly, `Controlled(Rz)` is the controlled version of the `Rz` operation. `Rz` has type `((Double, Qubit) => () : Adjoint, Controlled)`, so `Controlled(Rz)` has type `((Qubit[], (Double, Qubit)) => () : Adjoint, Controlled)`. For example, `((Controlled(Rz))(controls, (0.1, target))` would be a valid invocation of `Controlled(Rz)`.

As another example, `CNOT(control, target)` can be implemented as `(Controlled(X))([control], target)`. If a target should be controlled by 2 control qubits (`CCNOT`), we can use `(Controlled(X))([control1;control2], target)` statement.

### 2.3. Q# expressions

Expressions is an important part of any programming language and Q# is not an exception. Let us consider some of the important expressions.

Given any expression, that same expression enclosed in parentheses is an expression of the same type. For instance, `(7)` is an `Int` expression, `([1;2;3])` is an expression of type array of `Ints`, and `((1,2))` is an expression with type `(Int, Int)`.

The equivalence between simple values and single-element tuples removes the ambiguity between `(6)` as a group and `(6)` as a single-element tuple.

The name of a symbol bound or assigned to a value of type 'T' is an expression of type 'T'. For instance, if the symbol `count` is bound to the integer value 5, then `count` is an integer expression.

Numeric expressions are expressions of type `Int` or `Double`. That is, they are either integer or floating-point numbers.

`Int` literals in Q# are identical to integer literals in C#, except that no trailing "l" or "L" is required (or allowed). Hexadecimal integers are supported with a "0x" prefix.

`Double` literals in Q# are identical to double literals in C#, except that no trailing "d" or "D" is required (or allowed).

Given an array expression of any element type, an `Int` expression may be formed using the `Length` built-in function, with the array expression enclosed in parentheses, `( and )`. For instance, if `a` is bound to an array, then `Length(a)` is an integer expression. If `b` is an array of arrays of integers, `Int[][]`, then `Length(b)` is the number of sub-arrays in `b`, and `Length(b[1])` is the number of integers in the second sub-array in `b`.

Given two numeric expressions, the binary operators `+`, `-`, `*`, and `/` may be used to form a new numeric expression. The type of the new expression will be `Double` if both of the constituent expressions are `Double`, or will be an `Int` expression if both are integers.

Given two integer expressions, a new integer expression may be formed using the `%` (modulus), `^` (power), `&&&` (bitwise AND), `|||` (bitwise OR), `^^^` (bitwise XOR), `<<<` (arithmetic left shift), or `>>>` (arithmetic right shift) operations. The second parameter to either shift operation must be greater than or equal to zero. The behavior for shifting negative numbers is undefined.

Given any numeric expression, a new expression may be formed using the `-` unary operator. The new expression will be the same type as the constituent expression.

Given any integer expression, a new integer expression may be formed using the `~~~` (bitwise complement) unary operator.

The only `Qubit` expressions are symbols that are bound to `Qubit` values or array elements of `Qubit` arrays. There are no `Qubit` literals.

The four Pauli values, `PauliI`, `PauliX`, `PauliY`, and `PauliZ`, are all valid Pauli expressions.

Other than that, the only Pauli expressions are symbols that are bound to Pauli values or array elements of Pauli arrays.

The two `Result` values, `One` and `Zero`, are valid `Result` expressions.

Other than that, the only `Result` expressions are symbols that are bound to `Result` values or array elements of `Result` arrays. In particular, note that `One` is not the same as the integer 1, and there is no direct conversion between them. The same is true for `Zero` and 0.

Given any three `Int` expressions `start`, `step`, and `stop`, `start .. step .. stop` is a range expression whose first element is `start`, second element is `start+step`, third element is `start+step+step`, etc., until `stop` is passed. A range may be empty if, for instance, `step` is positive and `stop < start`. The last element of the range will be `stop` if the difference between `start` and `stop` is an integral multiple of `step`; that is, the range is inclusive at both ends.

Given any two `Int` expressions `start` and `stop`, `start .. stop` is a range expression that is equal to `start .. 1 .. stop`. Note that the implied `step` is `+1` even if `stop` is less than `start`; in such a case, the range is empty. For example, `1..3` is the range 1, 2, 3.

A callable literal is the name of an operation or function defined in the compilation scope. For instance, `X` is an operation literal that refers to the standard library `X` operation, and `Message` is a function literal that refers to the standard library `Message` function.

If an operation supports the `Adjoint` functor, then `(Adjoint op)` is an operation expression. Similarly,

if the operation supports the Controlled functor, then (Controlled op) is an operation expression.

Q# callables are allowed to be directly or indirectly recursive. That is, an operation or function may call itself, or it may call another callable that directly or indirectly calls the callable operation.

There are two important comments about the use of recursion, however:

- The use of recursion in operations is likely to interfere with certain optimizations. This may have a substantial impact on the execution time of the algorithm.

- When executing on an actual quantum device, stack space may be limited, and so deep recursion may lead to a runtime error. In particular, the Q# compiler and runtime do not identify and optimize tail recursion.

### 3. Q# program creation

In order to illustrate the possibilities of quantum computing via Q# language we will create a simple program in Visual Studio. As a precondition, Microsoft Quantum Development Kit should be installed on the computer.

Firstly, we should open Visual Studio 2017 and create a solution of the type “Q# Application”. Afterwards, optionally we should update the necessary NuGet packages. Now, it is possible to create a program.

Consider a simple program of setting a qubit state (see Fig. 1):

```
open Microsoft.Quantum.Primitive;
open Microsoft.Quantum.Canon;

operation Set (desired: Result, q1: Qubit) : ()
{
    body
    {
        let current = M(q1);
        if (desired != current)
        {
            X(q1);
        }
    }
}
```

Fig. 1. The qubit state setting function

As it can be seen from the code, the standard tools allow us to do everything via the standard library. Thus, we include the necessary standard tools on the first and the second lines and create a Set function accepting two parameters of Result and Qubit types respectively. Then, we get the current qubit state via M() function and compare the current state with the desired one. If they are not equal, we set the necessary state.

It should be clear from this example that having such a dedicated tool for a special computing paradigm as a language simplifies programming dramatically, since using other tools (e.g. calling an API) would require much more code.

Consider a more complicated example (see Fig. 2):

```
1 operation CheckState (count : Int, initial: Result) : (Int,Int) {
2     body {
3         mutable numOnes = 0;
4         using (qubits = Qubit(1)) {
5             for (test in 1..count) {
6                 Set (initial, qubits[0]);
7                 let res = M (qubits[0]);
8                 if (res == One) {
9                     set numOnes = numOnes + 1;
10                }
11            }
12            Set(Zero, qubits[0]);
13        }
14        return (count-numOnes, numOnes);
15    }
16 }
```

Fig. 2. A program checking if the qubit state was changed

It is another Q# program illustrating the convenience of using a dedicated programming language for quantum computing. In this code, we retrieve the results in the FOR loop and checking the values.

The using statement is similar to C# language. Thus, the code allocates a Qubit array with the length 1 and will make sure that it has been deallocated at the end of the using block.

### Conclusion

In scope of the article the basic tools of quantum computing have been investigated. The investigation covered Microsoft Quantum Development Kit, IBM Quantum Experience, Rigetti Forest and ProjectQ.

Since the first technology mentioned includes a separate Q# language for quantum computing, it was the main focus area of the given article.

Quantum computing technologies are important nowadays because of the research taking place for creating a quantum computer by scientific and technological companies, hence the investigation of the existing tools for quantum programs development is also important.

However, the given article only provides a brief overview of the currently existing technologies, so a deeper investigation including practical comparison of the programs created via the tools is a focus area for future research.

### References

1. Ю. И. Манин. Вычислимое и невычислимое. / Манин И. Ю. – М.: Сов. радио, 1980. – 128 с.
2. С. С. Moran. Quintuple: A tool for introducing quantum computing into the classroom. / Christine C. Moran – Frontiers in Physics 6(JUL). – p. 69.
3. L. Chen. Report on Post-Quantum Cryptography. / Lily Chen, Stephen Jordan, Yi-Kai Liu, Dustin Moody, Rene Peralta, Ray Perlner, Daniel Smith-Tone – NIST Interagency Report 8105, 2016. – 15 p.
4. The Q# Programming Language [Online]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/quantum/quantum-qr-intro?view=qsharp-preview>

Надійшла до редакції 22.03.2018

УДК 005.94 + 004.9



М. Vyshniak, I. Klymova

Kharkiv National University of Radio Electronics, Department of System Engineering,  
Kharkiv, Ukraine, mykhailo.vyshniak@nure.uaKharkiv National University of Radio Electronics, Department of System Engineering,  
Kharkiv, Ukraine, iryna.klymova@nure.ua

## THE BASIC ISSUES OF KNOWLEDGE MANAGEMENT BIONICS

Increasing the effectiveness of knowledge management in enterprises is possible if one takes into consideration the characteristics of a person to work with information and knowledge, remove the confusion with the basic concepts, determine the authentic object of knowledge management and see the roots of all that affects the result of the activity. This is helped by the main assertions (postulates, axioms) discussed in the paper, which are formulated with the involvement of research results from a number of areas, such as psychology, artificial intelligence, business organization, information systems and technologies, adult education, etc.

KNOWLEDGE, KNOWLEDGE MANAGEMENT, KNOWLEDGE DESCRIPTION, PERSONAL FEATURES, MODEL, AXIOM

**М.Ю. Вишняк, И.Н. Климова. Основные вопросы бионики управления знаниями.** Повышение эффективности управления знаниями на предприятиях возможно, если учитывать особенности человека по работе с информацией и знаниями, убрать путаницу с основными понятиями, определить действительный объект управления и увидеть корни всего того, что влияет на результат деятельности. В этом помогают рассмотренные в работе основные положения (аксиомы), которые сформулированы с привлечением результатов исследований целого ряда областей таких, как психология, искусственный интеллект, организация бизнеса, информационные системы и технологии, обучение взрослых и др.

ЗНАНИЕ, УПРАВЛЕНИЕ ЗНАНИЯМИ, ОПИСАНИЕ ЗНАНИЙ, ОСОБЕННОСТИ ЧЕЛОВЕКА, МОДЕЛЬ, АКСИОМА

**М.Ю. Вишняк, І.М. Климова. Основні питання біоніки управління знаннями.** Підвищення ефективності управління знаннями на підприємствах можливо, якщо враховувати особливості людини по роботі з інформацією і знаннями, прибрати плутанину з основними поняттями, визначити дійсний об'єкт управління і побачити коріння всього того, що впливає на результат діяльності. У цьому допомагають розглянуті в роботі основні положення (аксиоми), які сформульовані з залученням результатів досліджень цілого ряду областей таких, як психологія, штучний інтелект, організація бізнесу, інформаційні системи і технології, навчання дорослих та ін.

ЗНАННЯ, УПРАВЛІННЯ ЗНАННЯМИ, ОПИС ЗНАНЬ, ОСОБЛИВОСТІ ЛЮДИНИ, МОДЕЛЬ, АКСИОМА

### Introduction

As is known, bionics is engaged in revealing patterns of living nature and applying the obtained results in the development of modern technologies and systems. The most important applications are those where the key element is a person. These include knowledge management and systems implementing this technology.

Despite the fact that knowledge management is a powerful tool for increasing competitiveness, and research in this field has been conducted for more than 25 years, yet still practical applications do not meet expectations. Several authors carried out research to identify the causes of failure [11, 13, 16, 24 and etc.]. Also, opinions were expressed on the delimitation of the concepts “information” and “knowledge” [5, 17, 19 and etc.]. Distinguish these concepts is important because often information management is called knowledge management, and if the management object is another, then the results are different too. Improvement of the situation can occur if you pay attention to the root causes of problems [3]. The core of the reasons is the ignoring of an integrated approach that takes into account the

person peculiarities in working with information and knowledge.

Person is the main link in knowledge management. This position is stated by many authors, but in practice it is neglected. In knowledge management, knowledge itself becomes a “compelled” object of research, which should be studied. The problem of the concept of “knowledge” is also that everything that is in the person memory is taken to as knowledge, since we traditionally say: “I know, ...”, if it is contained in the memory.

The aim of the work is to find the basis for constructing systems that will better meet the expectations from knowledge management than existing ones.

According to the authors, to move forward in the field of knowledge management, as it does in any other theory, it is required formulate the basic provisions that will become the “starting point” for further research and in-depth analysis of previously obtained results. These statements will be perceived as axioms. This article provides a block of axioms that relate to the person peculiarities and allow these features to be taken into account in knowledge management.



The list of positions (axioms) is formulated on the basis of analysis and comprehension of the results of research conducted by many scientists and practitioners in the field of knowledge management and a number of other areas such as psychology, artificial intelligence, business organization, information systems and technology, adult education, etc.

**Axiom 1: Accept the model: Man is a “bio-computer”, and knowledge is his “programs”**

If we consider a person as a “bio-computer”, i.e. to take a projection or, in other words, allocate only its abilities to work with information and knowledge, then the level of confusion between the content of these two basic concepts is significantly reduced.

A self-learning, potentially developing “bio-computer” performs physical and mental actions, in accordance with the “programs” that are embedded in it and, usually, constantly complicated and modernized, which are knowledge.

The “Man is a bio-computer” model allows us not to identify knowledge with truth, which occurs in philosophical theories and classical ideas about knowledge, when only what is true can be knowledge. Although there is some softening: “practice is the criterion of truth”, but there one forgets that practice contains not a small portion of subjectivity based on available knowledge. The ancients believed that the Earth was flat, and their practice confirmed this. In his activity a person does not realize the degree of his knowledge truth, and it is not always true that on the basis of what he lives and acts. One can only say that some knowledge (often these statements) can claim the true, for example, Pythagorean theorem. The identification of knowledge with truth introduces a significant and unjustified restriction on working with them.

**Axiom 2: Knowledge locates only inside their owner. Knowledges are a model and abilities**

As it turned out, it seems very difficult to give the most appropriate definition to the notion “knowledge”, and to establish than we manage all the same. There are a lot of definitions of the basic concept of knowledge management, as well as a number of publications that analyze and identify the flaws of these definitions, for example, [6 and etc.].

Knowledge can be defined as mental objects that make up the system and combine two in one:

- a subjective image of objective reality (reflection of the external and internal world in the conscious and unconscious of a person) and
- mental “programs” (skills and abilities, i.e. accumulated prerequisites for) purposeful coordinated actions (at that mental and motor actions), which the brain operates through the nervous system.

For the formulation of the first component of the

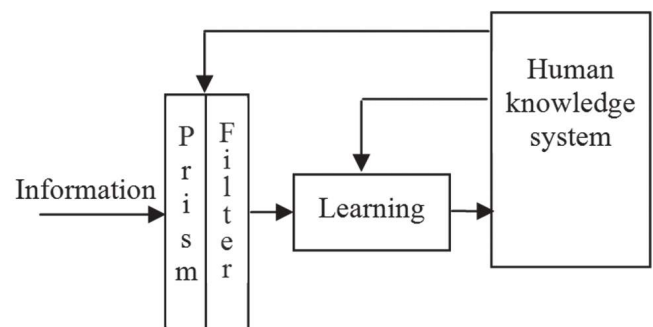
definition, the main provisions of the philosophical theory of reflection are taken (the subjective image is a model). For the second component, the extract of the views of M. Zeleny [5] and Witzel [1], the ideas of neuro-linguistic programming and psychology was used.

In general, knowledges provide the possibility to act and the ability to understand (understanding can be seen as a kind of mental actions). Knowledge is interpreted as a model of the person’s world and as its potential actions.

The subjective image (mental models [21]) has a predominant position. Mental “programs” obey it in the process of obtaining the result. The result is understood in the broad sense of the word: the taken decision, the written article, the developed scheme of the device, the organized work of the team or the created conditions at the enterprise, etc.

**Axiom 3: Knowledges are formed as a system**

Knowledge of a particular person is a complex self-organizing system [21]. This provision is practically not taken into account in the implementation of knowledge management systems. The system is inherent in maintaining its state and resisting changes. In this case, this is manifested in the fact that the information received by a person is filtered [9] and distorted by a “prism” [15].



**Fig. 1. The impact of the current state of the knowledge system on incoming information and the learning process**

This process is simplified in Fig. 1. As a result, information that corresponds to the current state of knowledge passes and strengthens it, and the one that goes against it is often ignored. Therefore, even if the employee is provided with the necessary information, he will not obligatorily use it.

In the process of fulfilling the functional duties by an employee, as well as operating with “raw” or poorly structured content relevant to activities, “fragmentary” knowledge is formed, for the systematization of which time and effort are required. “Fragmentary” knowledge often unable to provide the needful result. Document management systems, data warehouses, and other should not be fully related to knowledge management.

It is recommended to take into account that the subject knowledge, with which knowledge management works, is only a subsystem of the knowledge system.

**Axiom 4: Beliefs and settings are hidden drivers**

From psychology and neurolinguistic programming it is known that beliefs and settings significantly influence our behavior, therefore we distinguish this part of knowledge separately. Beliefs and settings are difficult to change, and some of them are in the unconscious, which in itself is difficult to access. If you ignore the presence of specific beliefs and settings from the employee, then again, he may be unsuccessfully dispose with the timely provided and necessary information, and, consequently, to show the wrong result.

**Axiom 5: People operate by knowledge descriptions in their interactions. Knowledge descriptions are model of a model**

Some of the knowledge can be described. They are represented in the form of texts and graphics. Using text and graphics we are trying to display what is in our mind, i.e. to build some model of our knowledge concerning a particular matter or topic.

From psychology it is known that terminology has a very strong influence on the thinking process, and if unsuitable terms are used, then the results may not be appropriate. The problem is that descriptions of knowledge are called “knowledge”, i.e. object is identified with its model. In a number of encyclopedias, dictionaries and, for example, in [10], knowledge is defined as “the result of the cognition process, usually expressed in language or in some sign form”. The term “codified” knowledge has long been used in English-language publications [18, 25 and etc.]. But it is better to use the term “knowledge descriptions” because when we say “codified knowledge,” it is meant that it is still knowledge, and in fact it is not so, and the term “knowledge descriptions” emphasizes that it is all the same descriptions, and not knowledge itself.

By the knowledge description we mean the mapping (model) of the person’s knowledge in sign form on any medium or their embodiment in some artifacts (“in some” means knowledge cannot be restored from all artifacts, for example, the recipe of bulat has been lost, the samurai’s sword gives us no information about

technology of its manufacture, etc.). Knowledge that is relevant to obtaining a certain result can have different descriptions, and each of these descriptions is not a complete representation of the knowledge itself. Since knowledge is a model, then knowledge descriptions are model of a model. In the knowledge transfer chain, there is always an error in composing the description and other error in its perception. The scheme shown in Fig. 2 was proposed in [4] and modified in [2].

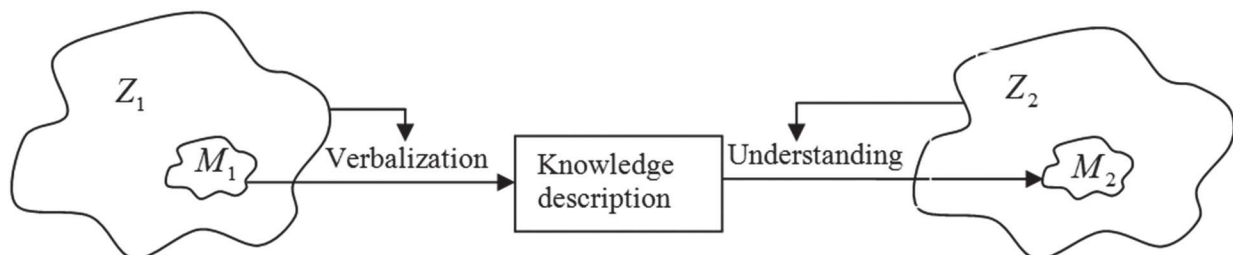
The following provisions supplement the notion of “knowledge description” and facilitate its practical application:

- knowledge descriptions are a subset of information received by a person;
- a person can perceive knowledge descriptions, if he has the necessary knowledge for this;
- the knowledge description implies the presence of the language, carrier and description tool;
- mastering the language, a person takes possession of certain knowledge;
- language allows forming complex images in consciousness, corresponding to knowledge;
- to make use of the knowledge descriptions, one must master the language of description;
- the language of the individual can be poor, which limits the individual in gaining knowledge.

**Axiom 6: People do not exchange knowledge but information, and this requires knowledge**

Knowledge is not transferred from the source to the recipient, but the person perceives information (knowledge descriptions) and recreates the corresponding knowledge in his brain. Exchange can be carried out if there is a transmitting and receiving party. If the receiving party does not have the necessary knowledge, then the message is simply skipped.

The person thinks in images, i.e. objects, phenomena, processes, etc. receive an inner holistic image in his consciousness. Information transmitted by the message, usually relates to some part of the image. Receiving a fragment of the image, a person attracts the contents of his memory and mentally completes the



**Fig. 2. The scheme of knowledge “transfer”**

$Z_1$  – the knowledge, which author possesses,  $Z_2$  – the knowledge, which recipient possesses;  
 $\mu_1$  – knowledge (meaning), laid down by the author of the description;  
 $\mu_2$  – knowledge (meaning), recreated by the trainee.  
 $\mu_1 \subset Z_1, \mu_2 \subset Z_2, \mu_1 \neq \mu_2$

whole, but already his own internal image. The degree of inconsistency between the internal images of the person who transmits information and the person who receives it is determined by the differences between their knowledge. Possible options: sufficient understanding, poor understanding, weak misunderstanding, complete misunderstanding. It is important to take into account the regularity, derived from the practice of teaching and communication, that if the knowledge of the interlocutors on the topic under discussion differs greatly, then the greater the difference, the more information is required to be transmitted.

**Axiom 7: Information is extracted from the data, ensures application and improvement of knowledge**

In a number of works [5, 14, 20, 22, etc.] is considered DIKW - "hierarchy" of data-information-knowledge-wisdom. But it's important to pay attention to where information comes from and on what basis knowledge is formed. In [12] a good example with a bushman illustrates the need for knowledge to understand the data and the difference between data, information and knowledge. The bushman has knowledge about the lion's tracks, and he can recognize the tracks, but he has no knowledge about street traffic lights, and is only able to observe the change of colors, not understanding why and how it happens.

We explain axiom 7 by the example of a bushman. In order for the data (the lion's traces) to become information, the bushman must have the knowledge that this small deepening in the sand is the trace of a lion. Here he applies knowledge to the small deepening seen on the sand and receives information. Then, to make use of this information, the bushman must again turn to knowledge to understand when there was a lion here. Further, depending on his intentions (hunting for a lion or wanting to avoid meeting him), the bushman again, on the basis of his knowledge, makes a decision for the subsequent actions. Carrying out actions and observing what is happening, the bushman improves his knowledge concerning the recognition of lion's tracks. Thus, we arrive at the following transformations:

- Data + knowledge → information
- Information + knowledge → knowledge<sup>+</sup>
- Information + knowledge → decision

Information + knowledge + decision → knowledge<sup>+</sup>, where → — means "it turns out"; knowledge<sup>+</sup> — means modernized knowledge.

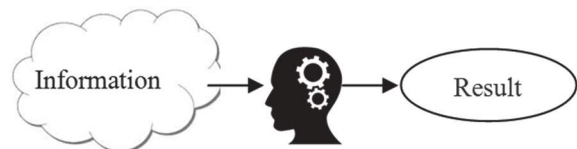
The first transformation in a somewhat expanded form is presented in [9], where is shown a process of human perception of information: the signal passes through physical, semantic and pragmatic filters. Interpretation of the scheme [9] in this context can be such. The signal, namely, the data, passes through the sense organs (the physical filter). Then there is access to

knowledge (a semantic filter), and the data can become information. After that, again, knowledge helps to evaluate the usefulness of the received information (a pragmatic filter). And that's all. But the above conversions show the continuation of actions with information.

In general, the information received can: 1) initiate actions, 2) identify (specify) the situation (object, ...), 3) become an ingredient in the process of improving personal knowledge.

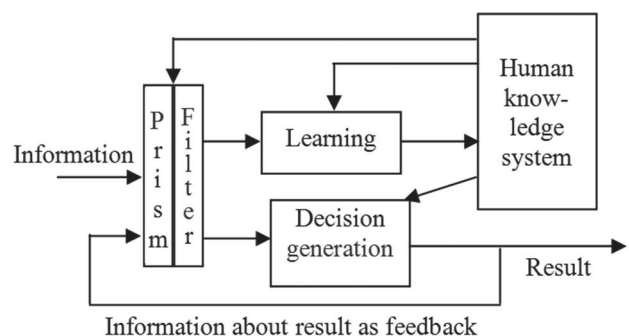
**Axiom 8: The result of the knowledge application is not knowledge itself**

Many authors consider decisions as knowledge, but decisions are generated, discussed and accepted on the basis of already existing knowledge and incoming information. For example, the method of "brainstorming" is psychologically arranged so that it allows stimulating and involving almost all the knowledge of participants. At the output a set of ideas for overcoming the discussed problem is gotten, which can subsequently affect the improvement of knowledge of participants and not only them (see figure 3).



**Fig. 3. A person converts information into a result on base of his knowledge**

Information arrives at the "input", a person transforms it by the application of knowledge, the result is the "output" of the transformation. "Transformer" and "output" is not the same thing. The result can be perceived as new information and subsequently it can influence the change in the state of the personal knowledge system. This feedback is shown in Figure 4.

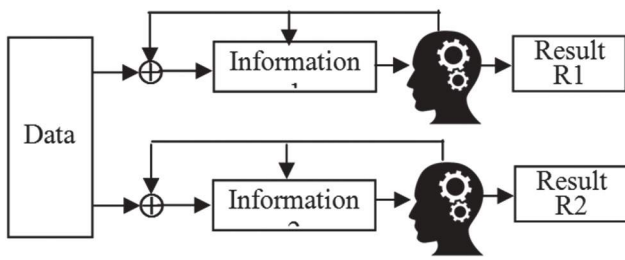


**Fig. 4. Feedback loop in the human knowledge system**

**Axiom 9: Different people process the same information differently**

Since the information that comes to a person passes through the "filter" and the "prism" of his knowledge (Fig. 1), different people perceive and process the same information differently. On base of this information,

people build their internal representations, which do not completely coincide with those of other people, or even they may be opposite. Consequently, solutions generated by them are also various (see Fig. 5).



**Fig. 5. Different people handle the same information differently. The solutions they generate may be different  $R1 \neq R2$**

For example, two managers have access to the same data, but they do not always produce the same decisions and receive not the same results, the same happens with two employees of the same department; a group of students listen to a lecture, but then they have different assessments.

Traditionally knowledge management relies on the fact that information (of almost any kind, but relevant) is sufficient for the employee to obtain the necessary knowledge in the course of his work. Such position, at a minimum, does not take into account the time required for obtaining knowledge, the degree of preparedness of the employee for perceiving information, the level of sufficiency of the information itself (knowledge descriptions).

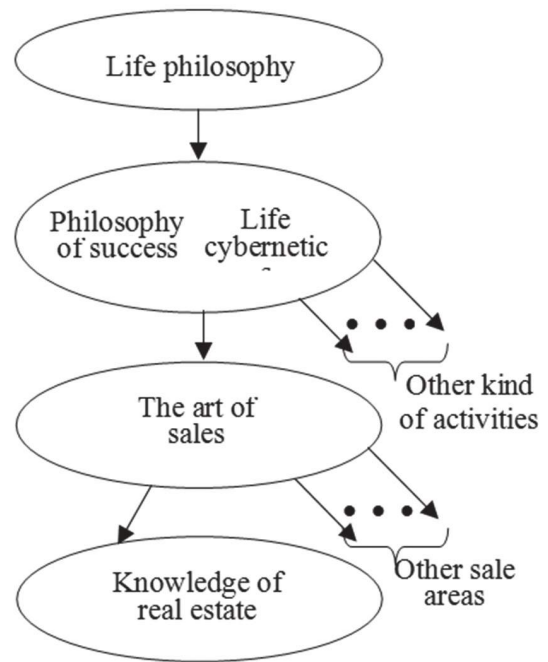
**Axiom 10: Knowledge is not transmitted, but recreated**

This assertion intersects with axiom 6. Some authors state this provision, for example [7, etc.], but, as a rule, they do not follow it further. The main reason is problems with basic concepts (see axiom 5, [3]).

**Axiom 11: Person performing actions uses knowledge of various levels**

A person, performing actions, simultaneously uses knowledge of various levels of commonality (hierarchy of knowledge) and each of them can be of varied quality. The quality of knowledge is determined by the quality of the result obtained with their help [5].

In practice, all attention is focused on knowledge only from an enterprise activity field, that is, it does on the knowledge of the lowest level of commonality. For example, a realtor is trained what to say on the phone and what to ask, but almost never it is taught him how to talk. But from practical psychology it is known that the outcome of the conversation largely depends on how to talk. In Fig. 6 shows an example of a truncated hierarchy of knowledge that a realtor actually uses in his practice, but neither he nor his leadership can guess it.



**Fig. 6. The hierarchy of knowledge by commonality**

**Axiom 12: Learning is the only way to gain knowledge**

A person can recreate his knowledge (axiom 10) only on the basis of already existing knowledge and perceived information (axiom 6). It is carried out by a permanently acting function it is called learning. A person can learn both with the teacher, and independently. Here we mean the obtaining of knowledge not only directly necessary for the performance of work, but in a broader sense, that is, the formation of knowledge as a model of the world and the development of various abilities (axiom 2). A person during wakefulness receives signals from the sensory organs. On the base of his knowledge, some of these signals are translated into information. And information affects the state of knowledge (axiom 7). Thus, a person constantly performs the function of "updating" his knowledge system: some elements are added, some connections are strengthened, and some are weakened.

Targeted staff training with knowledge management requires appropriate techniques and can be implemented in various ways. Herewith the existence of different types of learning should be taken into account: learning is simple and generative [21], learning by memorizing and cognitive learning [23], etc.

A person makes skills and abilities (coordinated actions) through repetitions and he uses feedback in this process. For example, wrestling techniques, writing articles, etc. you can not acquire only according to information from books, it is necessary to work out coordinated actions.

Scientific research can be considered as a kind of

self-learning process. Carrying out research, the scientist self-learns and creates own knowledge about the unknown nature of phenomena, objects, about the possibilities of constructing new structures, creating new materials, etc.

There are "obstacles" to learning, for example, mental models, dynamic complexity [21], etc. In the process of practice, the function of self-learning can work out and fasten false mental views and incorrect skills. For example, Casson G. in [8], illustrating this provision, notes that a woman, referring to her experience, can make bad coffee every day for forty years.

All these nuances should be taken into account when drawing up knowledge descriptions, methodologies and training programs, and also, if desired to achieve greater efficiency in knowledge management.

**Axiom 13: Person generates not knowledge, but decisions**

Often in publications there is an idea that specialists generate knowledge. Axiom 8 has already dealt with this situation. But the point of view that a person generates knowledge has proved to be quite stable, so we have to formulate a separate axiom.

It is usually believed that a person generates knowledge in the process of improving skills and abilities, cognizing something new, etc., when he changes mind views (templates, paradigms), improves efficiency and / or quality of results, etc. But "knowledge generation" is not a very suitable term. Knowledge is not generated, but the system of personal knowledge is improved. In the process of work, the employee generates ideas and checks them. Then information may be formed which, by feedback, may affect the change in person's knowledge (see figure in (8) and (axiom 7)).

**Axiom 14: Those or other conditions in the enterprise are created by managers on the basis of the current state of their knowledge**

During realization of knowledge management at enterprises, failures lie in wait when suitable conditions are not created. But these conditions are created by managers based on their knowledge. It is often forgotten that it is necessary to organize management not only of the performers' knowledge, but also of managers' knowledge.

**Axiom 15: The result of an activity is determined by the available knowledge and conditions in which this activity is performed**

M. Zeleny in [5] notes that knowledge can be demonstrated by action and the quality of knowledge can be assessed by the quality of the result achieved. An employee can get information about what and how to do, but he may not be able to do it or do it badly. He may not have enough motivation.

Conditions in which the knowledge of the performer is applied are determined by the knowledge of managers (axiom 14), the state of the equipment, the quality of the materials, a sufficient number of relevant information, and so on.

The result is given by a knowledgeable and motivated person supplied with sufficient information, and for whom the working conditions are organized by the managers.

**Axiom 16: Knowledge is the main object of management**

Although the term "knowledge management" is used, but it is often found that information is managed instead knowledge (for example, the main task is to provide the right information at the right time) or simply it needs organize the opportunity for communication and collaboration. Some authors argue that human knowledge cannot be managed at all. But humanity has been doing this for a long time, for example, by educating, joining to culture or creating a certain information environment (as an instrument of unstructured governance). To eliminate ambiguity, we define knowledge as the main object of management.

Knowledge management is a complex process, therefore, in addition to the main object; it is also expedient to define management subobjects such as knowledge descriptions, training system, infrastructure, corporate culture, IT architecture, etc.

**Conclusions**

To manage knowledge, not something else, and to receive results from the management of this particular object, and not some other, it is necessary to rely on the features of knowledge in their studies. Such a possibility is given by the totality of the axioms presented.

Axioms allow us to specify which functions and processes should be related to knowledge management, and which ones do not, which IT-tools, -facilities, -technologies and -systems directly participate in knowledge management, and which perform infrastructure or auxiliary roles, and so on, that is, more clearly define the boundaries between knowledge management and other types of management. It is important to understand this when creating knowledge management systems in enterprises where IT systems already function, and knowledge becomes a new object of management for enterprises.

The axioms of knowledge management differ from the axioms of mathematical theories. They should not be subject to analysis by formal logic, since knowledge management is not a formal theory. It is interdisciplinary in nature, with some of the disciplines studying very complex constantly evolving objects such as the human brain, management of organizational systems, etc. In addition, the basis of knowledge and reasoning

of person is nonmonotonic logic. For the same reasons, the set of axioms proposed in the paper is most likely not complete. In the course of further research, it can be expanded and corrected.

#### References:

1. *Витцель М.* Знание, определения понятия. / Информационные технологии в бизнесе / Под ред. М. Желены. – СПб.: Питер, 2002. – 1120 с. С. 198–210.
2. *Вишняк М.Ю., Климова И.Н.* Управление знаниями на автоматизированном предприятии/ АСУ и приборы автоматики. 2015. № 172. С. 38–43.
3. *Вишняк М.Ю., Климова И.Н.* Корни проблем и вызовы управления знаниями. //Материалы 5-й Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии». Харьков, 12-17 сентября 2016 г.: тезисы докладов/ - Х.: Друкарня Мадрид, 2016. – С. 200–201.
4. *Гаврилова Т.А., Червинская К.Р.* Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем. – М.: Радио и связь, 1992. – 200 с.
5. *Желены М.* Знание против информации. / Информационные технологии в бизнесе / Под ред. М. Желены. – СПб.: Питер, 2002. – 1120 с., С. 211–218.
6. *Костромина С.Н., Гнедых Д.С.* Информация и знание: подходы к пониманию процессов усвоения информации и формированию знаний в обучении // Вестник Ленинградского государственного университета им. А.С. Пушкина. 2015. – Т. 5. – №. 2. – С. 5–14.
7. *Кудрявцев Д.В.* Системы управления знаниями и применение онтологий: Учеб. пособие / Д.В. Кудрявцев. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 344 с.
8. *Кэссон Г. Н.* Искусство делать деньги: /Пер. с англ. – СПб: Издательство «Литера», издательство «ВИАН», 1997. – 160 с.
9. *Лопатников Л.И.* Информация (Information) // Экономико-математический словарь. Москва, «Наука», 1987. – 509 с. С. 145.
10. *Философия: Энциклопедический словарь* / Под ред. А.А. Ивина. – М.: Гардарики, 2004. – 1072 с.
11. *Akhavan P., Pezeshkan A.* Knowledge management critical failure factors: a multi-case study //VINE: The journal of information and knowledge management systems. – 2014. – Vol. 44. – № 1. – pp. 22-41.
12. *Boisot M.H.* Knowledge assets: Securing competitive advantage in the information economy. – Oxford: Oxford University Press, 1998. – 306 pp.
13. *Chua A., Lam W.* Why KM projects fail: a multi-case analysis //Journal of knowledge management. – 2005. – Vol. 9. – №. 3. – pp. 6–17.
14. *Cooper P.* Data, information, knowledge and wisdom //Anaesthesia & Intensive Care Medicine. – 2017. – Vol. 18. – №. 1. – pp. 55-56.
15. *Covey S. R.* The Seven Habits of Highly Effective People. Publ. by Simon & Schuster. 1989. – 291 pp. Available at: [https://img1.wsimg.com/blobby/go/5fa7ac32-9e78-4f70-87ef-a31ffec045f2/downloads/1c5kl999q\\_263813.pdf](https://img1.wsimg.com/blobby/go/5fa7ac32-9e78-4f70-87ef-a31ffec045f2/downloads/1c5kl999q_263813.pdf)
16. *Frost A.* A synthesis of knowledge management failure factors //Recuperado el. – 2014. – Т. 22. Available at: [https://www.knowledge-management-tools.net/A\\_Synthesis\\_of\\_Knowledge\\_Management\\_Failure\\_Factors.pdf](https://www.knowledge-management-tools.net/A_Synthesis_of_Knowledge_Management_Failure_Factors.pdf)
17. *Galandere-Zile I., Vinogradova V.* Where is the Border Between an Information System and a Knowledge Management System? //Managing Global Transitions. - 2005. – Vol. 3. – №. 2. – pp. 179-196.
18. *Kimble, C.* Knowledge management, codification and tacit knowledge // Information Research, 2013. 18(2) paper 577. [Available at <http://InformationR.net/ir/18-4/paper577.html>].
19. *Krżál M., Kubiż M.* Differences between Knowledge and Information Management Practices: Empirical Investigation //Proceedings of the International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management. – SCITEPRESS-Science and Technology Publications, Lda, 2016. – pp. 190–198.
20. *Nake F.* Data, information, and knowledge //Organizational Semiotics. – Springer, Boston, MA, 2002. – pp. 41–50.
21. *O'Conner J., McDermott I.* The art of systems thinking: Essential skills for creativity and problem solving //Thorsons. Google Scholar. – 1997. - 288 pages/
22. *Rowley J.* The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy //Journal of information science. – 2007. – Vol. 33. – № 2. – pp. 163-180.
23. *Schildt H.* Artificial Intelligence Using C - Mcgraw-Hill Osborne Media – 1987 – 412 pp.
24. *Weber R. O.* Addressing failure factors in knowledge management //Electronic Journal of Knowledge Management. – 2007. – Vol. 5. – №. 3. pp. 333 346.
25. *Zack M. H.* Managing codified knowledge //Sloan management review. – 1999. – Vol. 40. – №. 4. – pp. 45–58.

Надійшла до редакції 17.05.2018

УДК 574:004.942



**К.В. Носов<sup>1</sup>, Ю.Г. Беспалов<sup>1</sup>, Е.В. Высоцкая<sup>2</sup>, А.Н. Страшненко<sup>2</sup>, Е.С. Иванова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ХНУ им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина, k-n@nm.ru

<sup>2</sup>ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, evisotska@ukr.net

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКОСМОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕСТОВЫХ МИКРОЭКОСИСТЕМ**

Данная статья посвящена определению системных колориметрических параметров микрокосмов, обеспечивающих повышение колориметрической однородности поверхности, в составе тестовых микроэкоосистем. С использованием дискретных моделей динамических систем была получена идеализированная траектория системы, отражающая множество неповторяющихся комбинаций колориметрических параметров поверхности микрокосма. Эффективность использования найденного системного колориметрического параметра была проверена обработкой полученного изображения брюхоногого легочного моллюска, характер которого является признаком наличия или отсутствия токсичности. Это является важным фактором повышения эффективности применения тестовых микроэкоосистем в реальных ситуациях — за счет устранения маскирующего эффекта пестроты поверхности микрокосма на колориметрические признаки токсичности.

**МИКРОКОСМ, МИКРОЭКОСИСТЕМА, КОЛОРОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ, ТРАЕКТОРИЯ СИСТЕМЫ, ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ, БАЗА ДАННЫХ**

**К.В. Носов, Ю.Г. Беспалов, О.В. Висоцька, А.М. Страшненко, Е.С. Иванова. Моделювання колориметричних параметрів мікрокосмів для покращення режимів експлуатації тестових мікроекосистем.** Дана стаття присвячена визначенню системних колориметричних параметрів мікрокосмів, що забезпечують підвищення колориметричної однорідності поверхні, в складі тестових мікроекосистем. З використанням дискретних моделей динамічних систем була отримана ідеалізована траекторія системи, що відображає безліч неповторюваних комбінацій колориметричних параметрів поверхні мікрокосму. Ефективність використання знайденого системного колориметричного параметру була перевірена обробкою отриманого зображення червоногого легеневого моллюска, характер якого є ознакою наявності або відсутності токсичності. Це є важливим чинником підвищення ефективності застосування тестових мікроекосистем в реальних ситуаціях — за рахунок усунення маскуючого ефекту строкатості поверхні мікрокосму на колориметричні ознаки токсичності.

**МИКРОКОСМ, МИКРОЭКОСИСТЕМА, КОЛОРОМЕТРИЧНИ ПАРАМЕТРИ, ОБРОБКА ЗОБРАЖЕННЯ, ТРАЕКТОРИЯ СИСТЕМИ, ДИСКРЕТНИ МОДЕЛІ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ, БАЗА ДАНИХ**

**K.V. Nosov, Y.G. Bepalov, O.V. Vysotska, H.M. Strashnenko, E.S. Ivanova. Modeling the colorimetric parameters of microcosms to improve the operation modes of test microecosystems.** The article is devoted to the determination of the microcosms system colorimetric parameters, providing an increase in the colorimetric uniformity of the surface, as part of the test micro ecosystems., An idealized system trajectory was obtained with the help of discrete models of dynamic systems. It reflects many non-recurring combinations of colorimetric parameters of the microcosm surface. The efficiency of using the found system colorimetric parameter was verified by image processing of the gastropod pulmonary mollusk, the nature of which is a sign of the presence or absence of toxicity. This is an important factor to increase the effectiveness of the test microecosystems use in real situations — by eliminating the masking effect of the microcosm surface diversity on colorimetric signs of toxicity.

**MICROCOSM, MICROECOSYSTEM, COLOROMETRIC PARAMETERS, IMAGE PROCESSING, SYSTEM TRAJECTORY, DISCRETE MODELS OF DYNAMIC SYSTEMS, DATABASE**

### **Введение**

В экстремальных условиях техногенных катастроф серьезные угрозы биобезопасности могут создавать локальные очаги токсичности, возникшие в результате разрушения хранилищ токсических веществ и загрязнения ими отдельных участков местности. Важным условием элиминации указанных угроз биобезопасности является своевременное определение локализации этих очагов. Это обстоятельство определяет эффективность применения в таких ситуациях методов

биотестирования токсичности. Весьма эффективными могут оказаться дистанционные методы, предполагающие использование тестовых микроэкоосистем (ТМЭС), совместимых с относительно мало затратными и простыми в эксплуатации модификациями легких беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Соответствующие методы и устройства, защищенные патентами Украины на полезную модель [1], в настоящее время разработаны в рамках тем, которые совместно выполнялись ХНУ, ХНУРЭ и ХАИ. Эти методы предполагают

дистанционную регистрацию путем анализа колориметрических параметров (КП) изображений ТМЭС, полученных путем цифрового фотографирования с борта вышеуказанных модификаций БПЛА.

Для такой регистрации может создать трудности наличие рядом с ТМЭС, или даже на ее отдельных конструктивных элементах значимых для определения КП количеств зеленого хлорофилла и других растительных пигментов. Эти пигменты могут, в частности, находится в био пленке, образующей фитобентос и фитоперифитон на мелководье в местах приземления ТМЭС, сброшенных с БПЛА. Могут они также находиться в био пленке, образовавшейся на контейнере ТМЭС. Указанная био пленка является сообществом микроводорослей и бактерий, являющейся весьма близким аналогом так называемых лабораторных микрокосмов, давно используемых в исследованиях в области фундаментальной экологии. В связи с этим мы далее по тексту будем называть эту био пленку «микрокосмом». Колориметрические эффекты, позволяющие дистанционно регистрировать наличие токсичности, во многих случаях будут регистрироваться цифровой фотографией на фоне указанных микрокосмов. Исходные КП микрокосмов, непосредственно получаемые компьютерной обработкой компонентов RGB-модели цифровой фотографии, будут обладать значительной вариабельностью разных сочетаний яркости зеленого и красного. Речь идет о сочетаниях, обусловленных разным содержанием зеленого хлорофилла и желто-оранжевых растительных пигментов на разных стадиях сукцессии микрокосма. В связи с тем, что разные участки поверхности микрокосма могут находиться на разных стадиях его сукцессии, может иметь место значительная пестрота этой поверхности. Возникает проблема устранения маскирующего действия пестрого фона микрокосма на фиксируемые путем цифрового фотографирования ТМЭС колориметрического проявления токсичности. Упрощению решения этой проблемы будет способствовать нахождение обладающих сравнительно малой вариабельностью своих значений системных колориметрических параметров (СКП) микрокосмов. Речь идет о малой вариабельности на всех стадиях сукцессии микрокосма. Соответственно для улучшения режимов эксплуатации ТМЭС нужно формализованное описание смены сочетаний значений КП на разных стадиях сукцессии микрокосма. В экстремальных ситуациях техногенных катастроф возникает задача создания такого формализованного описания на основе ограниченного, имеющего лакуны фактического материала. Эта задача может быть решена с использованием имеющего мировую новизну созданного с участием авторов этой работы в ХНУ и

нашедшего уже применение для формализованного описания систем разной природы [2-4] нового класса математических моделей, получившего название дискретных моделей динамических систем (ДМДС). На основе структуры корреляционных отношений между компонентами системы ДМДС имеется возможность дать формализованное описание структуры межкомпонентных отношений обусловленных взаимными позитивными и негативными влияниями. Эта структура дополняется внутри компонентными негативными и позитивными симметричными отношениями. На основе указанной структуры межкомпонентных и внутрикомпонентных отношений для определенных начальных условий может быть построена идеализированная траектория системы (ИТС), которая отражает смену состояний системы. Речь идет о состояниях, которым соответствуют определенные, неповторяющиеся комбинации значений компонентов. В нашем случае это комбинации значений КП микрокосма. Моделирование с помощью ДМДС представленного в виде ИТС цикла смены значений КП микрокосма позволит найти СКП, значения которых относительно стабильны на всех стадиях его, микрокосма, сукцессии.

Актуальность решения этой задачи обусловлена практической значимостью решения проблемы улучшения режимов эксплуатации ТМЭС. Речь идет об улучшении режимов эксплуатации за счет элиминации маскирующего колориметрические эффекты токсичности влияния фона, образованного цветом микрокосма. Такое моделирование и является предметом настоящей работы.

### 1. Анализ последних достижений

Микрокосм представляет собой частный случай биологического сообщества, колориметрические параметры которого определяются содержанием хлорофилла и других растительных пигментов. Речь идет о колориметрических параметрах, которые могут быть зарегистрированы дистанционно.

В работе [5] описываются закономерности колориметрических параметров плавней в устье Дуная. Предполагается, что эти массивы тростника и других высших водных растений могут выполнять функции очистных сооружений, элиминирующих результаты загрязнения источников водоснабжения. Речь идет о функциях очистных сооружений работающих по схеме био плато [6, 7]. Дистанционный контроль указанных массивов высших водных растений необходим для устранения угрозы вторичного загрязнения воды вследствие отмирания и разложения биомассы высших водных растений.

В работе [8] представлены результаты математического моделирования пространственного распределения колориметрических параметров



сообществ плавающего растения *Pistia stratiotes*. Это тропическое растение внезапно дало вспышку биомассы в водоемах и водотоках умеренной зоны. Такое явление наблюдалось и в Украине и могло стать источником серьезных угроз разных видов водопотребления. С другой стороны, массивы *Pistia stratiotes* могут быть использованы в составе оригинальных конструкций биоплато. Эти конструкции обладают в частности тем достоинством, что существенно облегчает технологии удаления избыточной биомассы *Pistia stratiotes*. Отмирание и разложение этой избыточной биомассы может стать источником вторичного загрязнения воды. Эта угроза биобезопасности водопотребления обуславливает необходимость в указанных технологиях устранения избыточной биомассы. Дополнениям к этим технологиям должны служить методы контроля состояния сообществ этих плавающих растений, которые позволяют своевременно прогнозировать опасность вторичного загрязнения. При размещении таких сооружений на больших площадях труднодоступной местности наилучшими способами указанного контроля являются дистанционные (аэрокосмические). Такими сравнительно малозатратными и простыми в эксплуатации методами являются предусматривающие цифровую фотосъемку с борта легких дронов. Целью описанного в работе [8] математического моделирования является разработка методов такого дистанционного контроля. Речь идет о контроле, использующем колориметрические характеристики, которые могут быть получены с помощью цифровой фотоаппаратуры, входящей в комплект поставки относительно дешевых модификаций легких дронов.

В работе [9] описывается использование спутниковых методов для дистанционной оценки состояния соизмеримых по относительной простоте с микрокосмами сообществ морского фитопланктона и их влияние на оптические параметры. В данной работе речь идет о фитопланктонных сообществах Черного моря. Но следует заметить, что фитопланктон большинства водоемов представляет собой сравнительно простое биологическое сообщество. Законы, которым подчиняются изменения и пространственное распределение колориметрических параметров этого сообщества весьма близки к таковым микрокосма о котором идет речь в настоящей статье.

В работе [10] отмечается значение этих методов для мониторинга локализации в Балтийском море скоплений токсических цианобактерий, которые создают серьезные экологические проблемы. Отмечается, что для этого используется весьма дорогостоящая и сложная в эксплуатации аппаратура. И вместе с тем есть не получившие удовлетворительного решения проблемы, связанные с

необходимостью различения спектральных параметров токсических цианобактерий и других представителей фитопланктона.

В работе [11] для дистанционного обнаружения по колориметрическим параметрам скоплений токсических цианобактерий в Балтийском море предлагается другой подход. Он предполагает разбиение изображения акватории на сегменты, которые, в свою очередь, разбиваются на микро-сегменты. В каждом микро-сегменте, путем компьютерного анализа компонентов RGB-модели его изображения, определяются средние значения красной, зеленой и синей составляющих пикселя (далее по тексту обозначаемые как R, G, B). Затем определяются закономерности, которым подчиняется пространственное распределение в сегменте, микро-сегментов с разными комбинациями значений R, G, B. Эти закономерности в указанной работе [11] определяются с использованием обладающего мировой новизной оригинального класса математических моделей, получившего название дескриптивных бинарных моделей (ДБМ). Далее, проводят сравнительный анализ указанных закономерностей, полученных для скоплений токсических цианобактерий и свободных от них участков акватории. С использованием результатов такого анализа находят СКП, позволяющие повысить контрастность данных в условных цветах изображений этих скоплений на фоне воды.

В настоящей работе нахождение сохраняющих относительную стабильность значений СКП микрокосма на всех стадиях его сукцессии, осуществляется похожим образом. Одно из отличий заключается в использовании ДМДС вместо ДБМ. Это позволяет найти закономерности пространственного распределения на поверхности микрокосма разных комбинаций КП на основе сравнительно небольшого по объему фактического материала. Затем эти закономерности используются для нахождения СКП, позволяющего устранить пестроту поверхности микрокосма, маскирующую колориметрические признаки токсичности. Таким образом, целью исследования является нахождение, с использованием ДМДС, системных колориметрических параметров, обеспечивающих повышение колориметрической однородности поверхности, микрокосмов, в составе ТМЭС; эта колориметрическая однородность должна способствовать эффективности эксплуатации ТМЭС – за счет устранения маскирующего эффекта пестроты поверхности микрокосма на колориметрические признаки токсичности.

## 2. Результаты моделирования колориметрических параметров микрокосмов

Для нахождения системных колориметрических параметров микрокосма были выполнены

следующие этапы:

– построение ИТС, отражающей множество неповторяющихся комбинаций значений КП поверхности микрокосма. Необходимое для построения этой ИТС математическое моделирование с применением ДМДС осуществляется на основе компьютерного анализа компонентов RGB-модели цифровой фотографии поверхности микрокосма [12];

– формулирование, путем анализа вида ИТС, рабочей гипотезы относительно СКП, сохраняющихся, на протяжении всего представленного в ИТС цикла изменений значений КП, относительную стабильность своих значений;

– проверка указанной рабочей гипотезы с использованием специально созданной базы данных (БД). Такая проверка включает следующие операции. Внесение в БД значения того или иного СКП для каждого сегмента изображения вместе с данными о других полях значений – отражающих расположение этого сегмента на изображении;

– построение обработанного изображения ТМЭС с обозначением условными цветами сегментов с разными значениями СКП. Визуальная оценка однородности КП изображения микрокосма, на фоне которого идентифицируются другие элементы ТМЭС и их состояния. Речь идет о состояниях, связанных с наличием или отсутствием токсичности.

В результате настоящей работы, с использованием ДМДС, была получена ИТС, отражающая множество неповторяющихся комбинаций КП поверхности микрокосма. Речь идет о КП, которые отражают разные аспекты биопродукционных процессов на разных стадиях сукцессии микрокосма. Значения этих КП вычислялись на основании полученных компьютерной обработкой значений вышеописанных R, G, B параметров цифровой фотографии поверхности микрокосма:

–  $R/(R+G+B)$  – отражает содержание в микрокосме желто-оранжевых растительных пигментов, преобладание которых характерно для старых и мертвых клеток фотосинтезирующих микроорганизмов в составе биопленки;

–  $G/(R+G+B)$  – отражает содержание в микрокосме зеленого пигмента хлорофилла, преобладание которого характерно для молодых клеток активно фотосинтезирующих микроорганизмов в составе биопленки;

–  $(R+G)/(R+G+B)$  – отражает суммарное содержание в микрокосме биомассы молодых, живых, старых и мертвых клеток фотосинтезирующих микроорганизмов в составе биопленки;

–  $R/G$  – «желто-зеленый индекс», который отражает пигментное разнообразие в микрокосме, связанное с его стабильностью.

Вид указанной ИТС представлен в табл. 1

Таблица 1

Вид ИТС, отражающей множество комбинаций значений КП на разных стадиях сукцессии микрокосма

Номера условных шагов по времени	1	2	3	4	5	6	7	8
R/G	1	1	1	1	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
$R/(R+G+B)$	1	1	2	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	2	1
$G/(R+G+B)$	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	2	1	1	1	1
$(R+G)/(R+G+B)$	2	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	2	1	1	1

В табл. 1 столбцы представлены условные шаги по времени. Строки – значения КП в условных баллах (1 – низкое, 2 – среднее, 3 – высокое). Жирным шрифтом обозначены значения КП, максимальные для данной таблицы.

Проводился анализ вида ИТС для нахождения комбинаций значений КП, которые могут сыграть роль сравнительно стабильных СКП. При обработке изображения ТМЭС с использованием таких СКП можно минимизировать пестроту поверхности микрокосма. Поверхность микрокосма является фоном, на котором наблюдаются, колориметрические эффекты наличия или отсутствия токсичности. Пестрота этого фона может маскировать указанные колориметрические эффекты. Соответственно – устранение пестроты фона будет способствовать их демаскировке.

Рассматривалась возможность получения СКП с указанным эффектом путем использования отношений значений определенных пар КП. В этом смысле представляют интерес пары КП, максимальные значения которых редко наблюдаются (или – вообще не наблюдаются) в ИТС на одних и тех же условных шагах по времени. Можно высказать рабочую гипотезу, в соответствии с которой суммы, произведения и частные от деления значений этих пар КП будут относительно стабильны. Соответственно – эти отношения значений КП могут быть использованы как СКП. Речь идет об СКП, использование которых при обработке изображений ТМЭС может снизить пестроту фона, образуемого поверхностью микрокосма. А уменьшение этой пестроты позволит снизить эффект маскировки ею колориметрических токсичности.

Анализ вида ИТС, представленной в табл. 1, позволяет выделить следующие пары:

- $R/(R+G+B)$  и  $G/(R+G+B)$ ;
- $R/(R+G+B)$  и  $(R+G)/(R+G+B)$ ;
- $R/(R+G+B)$  и  $R/G$ ;
- $G/(R+G+B)$  и  $(R+G)/(R+G+B)$ ;
- $G/(R+G+B)$  и  $R/G$ ;
- $(R+G)/(R+G+B)$  и  $R/G$ ;

Можно выдвинуть рабочую гипотезу, в соответствии с которой будут относительно невелики показатели вариабельности суммы, произведения и

частных от деления измеренных для сегментов поверхности микрокосма значений, входящих в эти пары КП.

В рамках настоящей работы эта гипотеза проверялась применительно к паре КП, включающей  $R/(R+G+B)$  и  $G/(R+G+B)$ . Эта пара была выбрана в связи с наибольшей простотой интерпретации ее биологического и оптико-физического смысла. Следует отметить, что в каждой строке Таблицы 1, нормализация значений КП в условных баллах дается в пределах своего интервала значений. Данные в условных баллах значения одних КП не могут быть получены в результате простых арифметических действий над другими КП.

Предполагалось, что вариабельность значений СКП, полученных делением суммы  $(R+G)$  на сумму  $(R+G+B)$ , а затем на произведение  $R \cdot G$  для изображения микрокосма будет относительно невелика. В качестве меры вариабельности использовалось среднее квадратичное отклонение. Его значение определялось для выборки значений, измеренных для множества микросегментов каждого сегмента изображения. Результаты такого определения значения среднего квадратичного отклонения заносились в БД. В запись, относящуюся к конкретному сегменту, вместе с этими результатами вносились данные полей значений, несущие информацию о расположении сегмента на изображении. При обработке изображения значения среднего квадратичного отклонения указанного СКП на сегменте обозначалось определенным условным цветом. Результаты такой обработки изображения ТМЭС представлены на рис. 1, 2, 3.

На рис. 1 на фоне микрокосма биопленки прозрачного контейнера ТМЭС изображен брюхоногий легочный моллюск, положение которого в средней части контейнера - показатель отсутствия острой токсичности. Это положение может быть зафиксировано визуально или по изменению оптических параметров средней части контейнера.

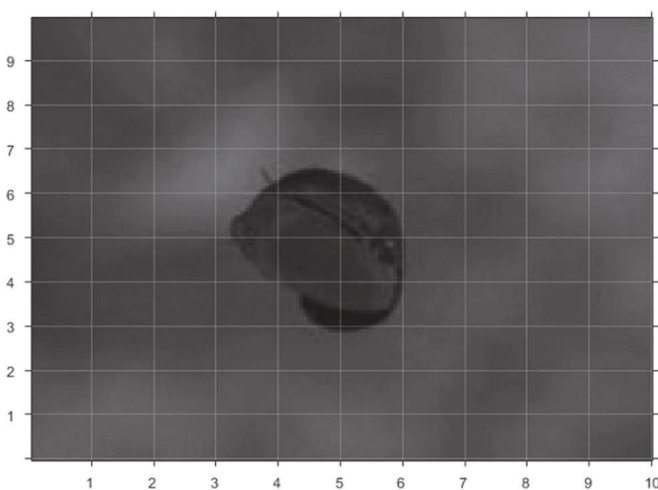


Рис. 1. Исходный вид цифровой фотографии ТМЭС

Как видно из сравнения рис. 2 и 3, обработка с применением полученного в результате настоящей работы СКП повышает колориметрическую однородность изображения микрокосма. Вследствие этого пестрота образованного им фона не маскирует изображение элемента ТМЭС (брюхоногого легочного моллюска), характер которого является признаком наличия или отсутствия токсичности. Это является важным фактором повышения эффективности применения ТМЭС в реальных ситуациях.

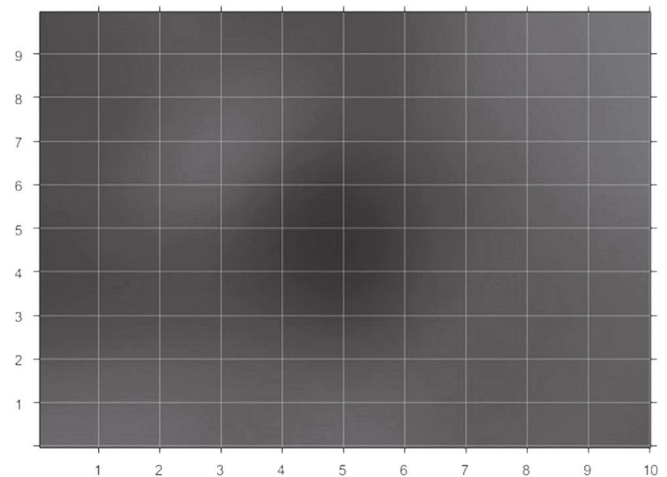


Рис. 2. Результат компьютерной обработки, искусственно уменьшающей контрастность изображения представленного на рис. 1.

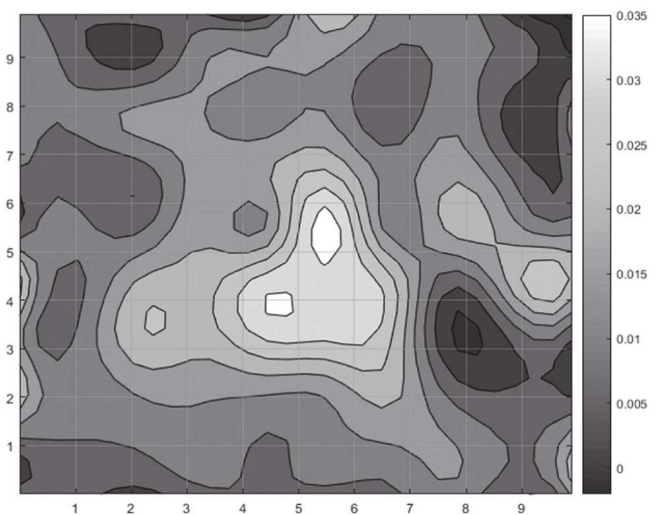


Рис. 3. Результат обработки с использованием полученного СКП изображения, представленного на рис.2

### Выводы

Представленные в настоящей работе результаты проведенного с применением ДМДС математического моделирования говорят об эффективности его применения в рамках информационной технологии повышающей эффективность применения ТМЭС, имеющих в своем составе микрокосмы. Речь идет об использовании ДМДС

в качестве инструмента порождения рабочих гипотез. Преимущество ДМДС, как средства формулирования рабочих гипотез, определяется возможностью непосредственно наглядно представить структуру обратных связей и следующую из нее динамику исследуемой системы. Это преимущество весьма значимо, например, в сравнении с описанными в работе [13] подходами, основанными на использовании различных мер биоразнообразия. Формирование базирующихся на этих подходах гипотез о различных аспектах (в частности – стабильности) функционирования конкретных биологических систем требует больших объемов фактического материала. Применение ДМДС требует для этого значительно меньших объемов фактического материала, который может иметь лакуны и непосредственно не отражать динамику исследуемых процессов в реальном времени.

В рамках настоящей работы показана возможность практического применения технологии, включающей формулирование с помощью ДМДС рабочих гипотез и их проверка путем анализа изображений ТМЭС с помощью специально созданной БД.

#### Список литературы:

1. Спосіб дистанційного біологічного тестування гострої токсичності водного середовища: пат. 115829 Україна: МПК G01N33/18(2006/01); заявл. 30.11.16; опубл. 25.04.2017, Бюл. № 8. 2. Беспалов Ю.Г., Бых А.И., Печерская А.И., Высоцкая Е.В. Оценка состояния гидробиоценоза с использованием дискретных моделей динамических систем. Современные проблемы математики, механики и информатики, 2013. С. 87-88. 3. Zholtkevych G.N., Bespalov Y.G., Nosov K.V., Abhishek M. Discrete Modeling of Dynamics of Zooplankton Community at the Different Stages of an Antropogeneous Eutrophication. Acta Biotheoretica, 2013. – 61(4). P. 449-465. 4. Bespalov Yu., Nosov K., Kabalyants P. Modeling systemic colorimetric parameters as a tool for

processing images of clumps of toxic cyanobacteria targeted at their boundaries detection. bioRxiv 232413. URL: <https://www.biorxiv.org/content/biorxiv/early/2017/12/13/232413.full.pdf> 5. Balym Y., Georgiyants M., Vysotska O. Pecherska A. [et al.] Mathematical modeling of the colorimetric parameters for remote control over the state of natural bioplato. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017. Vol 4. No 10 (88). 6. Мелехин А.Г., Шукин И.С. Анализ существующих биоинженерных сооружений очистки поверхностного стока и возможности их применения в условиях Западного Урала Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура, 2013. №2. С. 40-51. 7. Станкевич В.В., Тарабарова С.Б., Береза А.Ю. Використання біоплато для доочищення стічних вод від малих населених пунктів. Гігієна населених місць, 2015. № 65. С. 108-113. 8. Печерская А.И., Высоцкая Е.В., Григорьев А.Я., Радзишевская Е.Б. [и др.] Компьютеризированный анализ пространственного распределения биопродукционных процессов на изображениях биоплато с плавающими растениями. Системы обработки информации, 2017. № 5(151). С. 96-102. 9. Карабашев Г.С., Евдошенко М.А. О сезонной изменчивости максимума спектра коэффициента яркости Черного моря по спутниковым данным. Океанология, 2015. Т. 55. No 2. С. 182–191. 10. Карабашев Г.С. Евдошенко М.А. Спектральные признаки цветения цианобактерий в Балтийском море по данным сканера MODIS. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015. Т. 12. No 3. С. 158-170. 11. Nosov K., Zholtkevych G., Georgiyants M., Vysotskaya O. [et al.] Development of the descriptive binary model and its application for identification of clumps of toxic cyanobacteria. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017. 4(4 (88)). С. – 4-11. 12. Zholtkevych G.N., Bespalov Y.G., Nosov K.V., Abhishek M. Discrete Modeling of Dynamics of Zooplankton Community at the Different Stages of an Antropogeneous Eutrophication. Acta Biotheoretica, 2013. 61(4). С. 449-465. 13. Bukvareva E.N., Aleshchenko G.M. Optimization, Niche and Neutral Mechanisms in the Formation of Biodiversity. American Journal of Life Sciences, 2013. V. 1. No. 4. P. 174-183.

Поступила в редколлегию 02.02.2018

УДК 519.861:519.81

А.В. Маргіна<sup>1</sup>, О.О. Мазурова<sup>2</sup>, М.С. Широкопетлева<sup>3</sup><sup>1</sup>ХНУРЕ, м. Харків, Україна, ann.margina@gmail.com<sup>2</sup>ХНУРЕ, м. Харків, Україна, oksana.mazurova@nure.ua<sup>3</sup>ХНУРЕ, м. Харків, Україна, marija.shirokopetleva@nure.ua

## РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАДАЧІ ПЛАНУВАННЯ ВИТРАТ ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВЛАСНИМ БЮДЖЕТОМ

Запропоновано математичну модель задачі планування витрат для розширення функціоналу систем керування бюджетом. Математична модель, що врахує витрати, поточні та можливі прибутки людини, дозволить знайти найкращий план досягнення фінансової мети. Ієрархічні плани досягнення мети пропонується створювати як низку депозитних вкладів, що разом з активними доходами людини надають можливість отримання додаткового пасивного доходу для довгострокових накопичень. Обрати оптимальний план пропонується на базі лінійної адитивної згортки з ваговими коефіцієнтами. На основі моделі запропоновано критерії оцінки якості планів. Розроблена модель апробована під час створення системи керування власним бюджетом.

КЕРУВАННЯ БЮДЖЕТОМ, ПЛАНУВАННЯ ВИТРАТ, ІЄРАРХІЧНИЙ ПЛАН, ФІНАНСОВА МЕТА, ДЕПОЗИТ, КРИТЕРІЙ ЯКОСТІ, ОПТИМАЛЬНИЙ ПЛАН

**А.В. Маргина, О.А. Мазурова, М.С. Широкопетлева. Разработка математической модели задачи планирования затрат для системы управления личным бюджетом.** Предложена математическая модель задачи планирования расходов для расширения функционала систем управления бюджетом. Математическая модель, которая учитывает расходы, текущие и возможные доходы человека, позволит найти наилучший план достижения финансовой цели. Иєрархические планы достижения цели предлагается создавать как ряд депозитных вкладов, которые наряду с активными доходами человека предоставляют возможность получения дополнительного пассивного дохода для долгосрочных накоплений. Выбирать оптимальный план предлагается на базе линейной аддитивной свертки с весовыми коэффициентами. На основе модели предложены критерии оценки качества планов. Разработанная модель апробирована при создании системы управления личным бюджетом.

УПРАВЛЕНИЕ БЮДЖЕТОМ, ПЛАНИРОВАНИЕ ЗАТРАТ, ИЄРАРХИЧЕСКИЙ ПЛАН, ФИНАНСОВАЯ ЦЕЛЬ, ДЕПОЗИТ, КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА, ОПТИМАЛЬНИЙ ПЛАН

**Marhina Anna, Mazurova Oksana, Shirokopetleva Mariya. Development of a mathematical planning model in Budget management system.** There was proposed the mathematical model of cost planning problem to expand functional of budget management systems. The mathematical model takes into account costs, current and possible incomes of a person. That model will help to find the best plan for achieving a financial goal. Hierarchical plans for achieving the goal are proposed to be created as a series of deposits, which along with active human income provide an opportunity to receive additional passive income for long-term savings. The optimal plan is proposed on the basis of linear additive convolution with weight coefficients. Plans quality criteria based on the model was proposed. The developed model was approved at creation of a management system for the personal budget.

BUDGET MANAGEMENT, COST PLANNING, HIERARCHICAL PLAN, FINANCIAL PURPOSE, DEPOSIT, QUALITY CRITERION, OPTIMAL PLAN

### Введення

Облік та планування бюджету є актуальною проблемою практично для будь-якої сучасної людини. Різноманітність товарів та послуг, а також рівень розвитку фінансової сфери вимагають грамотного розпорядження власними фінансами. В умовах економічної кризи будь-яка коштовна покупка часто вимагає від пересічної людини планування накопичень відповідних коштів з урахуванням поточних прибутків та витрат [1].

На сьогодні існує багато програмних додатків для обліку приватних прибутків та витрат, наприклад, Fentyru, Vuxfer, BudgetSimple. Однак, вони частіше за все не дозволяють планувати власний бюджет та не підтримують знаходження оптимальних шляхів накопичення коштів. Грамотне планування власного бюджету потребує не тільки урахування таких чинників, як поточні прибутки

та витрати, можливі шляхи отримання нових прибутків, а й потребує використання відповідних методів побудови оптимальних планів досягнення тієї чи іншої фінансової мети [2]. Таким чином, існує потреба в розробці програмних систем, що допоможуть керувати власним бюджетом та найкращим чином планувати значні витрати з нього.

### 1. Аналіз основних досліджень

Найбільш популярним серед підходів теорії прийняття рішень до вирішення оптимізаційних задач є математичне програмування [2, 3]. Але в області побудови фінансових планів [1, 4] існує велика кількість факторів, що необхідно врахувати в математичній моделі оптимізаційної задачі. Крім того, існують такі суб'єктивні фактори як переваги людини, що не дозволяє ефективно використовувати цей достатньо об'єктивний математичний підхід [5, 6, 7].

Теорія планування рішень пропонує методи побудови можливих планів досягнення мети з урахуванням великої кількості факторів [8, 9]: методи календарного, мережевого планування та інші. В цьому випадку, процес фінансового планування може бути інтерпретований як пошук шляху у графі, одна з вершин якого буде відповідати вихідній фінансовій ситуації, а інші вершини – ситуаціям, що утворюється в результаті застосування до вхідної ситуації деяких дій.

Якщо до множини отриманих таким чином можливих планів досягнення фінансової мети застосувати методи підтримки прийняття рішень [6], це дозволить врахувати суб'єктивні переваги людини та отримати справді найкраще рішення в галузі планування власних витрат.

### 2. Постановка задачі

Отже, для підтримки процесу планування власного бюджету з метою отримання оптимального плану досягнення фінансової мети необхідно розробити математичну модель задачі планування витрат, що врахує власні прибутки та витрати людини, дозволить побудувати плани та знайти найкращий з урахуванням суб'єктивних переваг особи, що приймає рішення (ОПР) [5].

Була поставлена задача розробити математичну модель задачі планування витрат, що дозволить отримати найкращий план досягнення фінансової мети на базі таких пасивних видів доходів, як депозити, та провести її апробації під час створення системи керування власним бюджетом.

### 3. Математична модель планування витрат

Для задачі  $Z = \langle S_b, S_e, P^{opt} \rangle$  планування власних витрат основними складовими було обрано початковий фінансовий стан людини  $S_b$ , кінцевий фінансовий стан  $S_e$  (тобто фінансову мету, яку хоче досягти людина), та саме найкраще рішення (план)  $P^{opt}$  досягнення цієї мети.

Фінансовий стан людини  $S = S(t)$  визначається моментом часу  $t$ . Отже, у початковий момент планування  $t_b$  фінансовий стан —  $S_b = S(t_b)$ , у кінцевий момент  $t_e$  планування —  $S_e = S(t_e)$ .

Для визначення фінансового стану людини ми обмежилися такими факторами, як фінансові накопичення людини  $N(t)$  на момент часу  $t$ , активні доходи (наприклад, виплати з основної/додаткової роботи)  $A(t)$ , витрати  $R(t)$  на момент часу  $t$  та пасивні доходи  $D(t)$  від депозитів. Отже, фінансовий стан (див. рис. 1) може бути представлений як

$$S = S(t) = F^S(N(t), A(t), R(t), D(t)).$$

$N(t) = F^N(C(t))$  — загальне накопичення, що може бути оцінено на базі множини  $C(t) = \{C_j(t)\}_{j=1}^m$  накопичень у різних валютах, де  $C_j(t)$  — накопичення у  $j$ -й валюті. Накопичення  $C_j(t) = \langle S_j, V_j \rangle$  у валюті визначається сумою  $S_j$  у  $j$ -й валюті та самою валютою  $V_j$ . Визначити суму накопичень на момент часу  $t$  у валюті  $i$  можна як

$$N^i(t) = \sum_{j=1}^m (S_j * CUR_j^i), \tag{1}$$

де  $CUR_j^i$  — курс  $j$ -й валюти до  $i$ -ї.

Активні доходи  $A(t)$  на момент часу  $t$  можна визначити як множину  $A(t) = \{A_l(t)\}_{l=1}^k$  доходів  $A_l(t)$ , що отримує людина з певною періодичністю як заробітну платню за усіма видами роботи  $l$ . Окремий активний дохід може бути визначений як

$$A_l(t) = F^A(S_l, t_l^0, d_l, V_l),$$

де  $S_l$  — сума  $l$ -го доходу;  $d_l$  — періодичність  $l$ -го доходу ( $d_l = 0$ , якщо дохід одноразовий, в іншому випадку  $d_l > 0$ );  $V_l$  — валюта  $l$ -го доходу.

На початок планування вважатимемо, що всі виплати з активних доходів на момент часу  $t_b$  отримано та переведено в розряд накопичень, тобто  $A(t_b) = 0$ .

Сума  $l$ -го доходу в  $i$ -й валюті на момент часу  $t'$  може бути розрахована як

$$A_l^i(t') = \begin{cases} S_l * \text{div}((t' - t_l^0), d_l) * CUR_l^i, & \text{якщо } d_l \neq 0 \\ S_l * CUR_l^i, & \text{якщо } d_l = 0 \text{ та } t_b < t' \end{cases}, \tag{2}$$

де  $\text{div}((t' - t_l^0), d_l)$  — цілочисельне ділення проміжку часу від останньої дати отримання доходу  $t_l^0$  до часу  $t'$  на періодичність отримання доходу  $d_l$ .

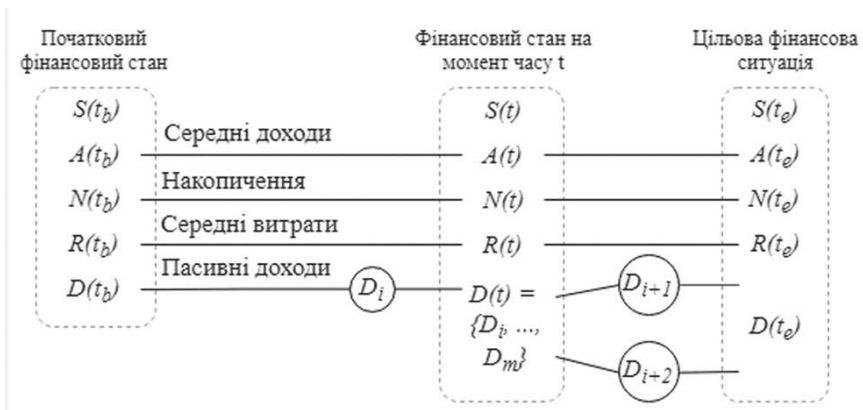


Рис. 1. Схема зміни фінансового стану залежно від часу  $t$

Фінансові витрати  $R(t) = \{R_n(t)\}_{n=1}^m$  на момент часу  $t$  складаються з множини різноманітних періодичних (наприклад, квартплата або абон.плата за телефон) та одноразових (сума та періодичність витрат непередбачувані) витрат (наприклад, купівля їжі або витрати на одягу). Кожна витрата може бути промодельована як

$$R_n(t) = F^R(S_n, t_n^0, d_n, V_n),$$

де  $S_n$  – сума  $n$ -ї витрати;  $d_n$  – періодичність  $n$ -ї витрати ( $d_n = 0$ , якщо витрата одноразова, в іншому випадку  $d_n > 0$ );  $V_n$  – валюта  $n$ -ї витрати.

На початок планування  $t_b$

вважатимемо, що всі витрати вже відраховані з накопичень, тобто  $R(t_b) = 0$ .

Сума  $n$ -ї витрати в  $i$ -й валюті на момент часу  $t'$  може бути вирахована як

$$R_n^i(t') = \begin{cases} S_n * \text{div}((t' - t_n^0), d_n) * CUR_n^i, & \text{якщо } d_n \neq 0 \\ S_n * CUR_n^i, & \text{якщо } d_n = 0 \text{ та } t_b < t' \end{cases}, \quad (3)$$

де  $\text{div}((t' - t_n^0), d_n)$  – цілочисельне ділення проміжку часу від останньої дати витрати  $t_n^0$  до моменту  $t'$  на періодичність витрати  $d_n$ .

Множина депозитів  $D = \{D_p\}_{p=1}^q$  складається з активних на момент часу  $t$  депозитів

$$D_p = F^D(S_p, t_p, t_{sp}, Dep_p)$$

де  $S_p$  – сума депозиту;  $t_p$  – дата вкладу;  $t_{sp}$  – термін вкладу;  $Dep_p$  – тип депозиту.

В свою чергу тип депозиту визначається як

$$Dep_p = \langle Name, Bank, Rel, S_{min}, S_{max}, t, Per, V \rangle,$$

де  $Name$  – назва депозиту;  $Bank$  – назва банку;  $Rel$  – надійність банку за 10-ти бальною шкалою;  $S_{min}$  – мінімальна можлива сума вкладу;  $S_{max}$  – максимальна сума вкладу;  $t$  – термін вкладу;  $Per$  – процентна ставка за вкладом;  $V$  – валюта.

На початок планування вважатимемо, що всі виплати з депозитів на момент часу  $t_b$  вже перейшли до розряду накопичень, тобто  $D(t_b) = 0$ .

Сума, яку можна отримати на момент часу  $t'$  від  $p$ -го депозиту може бути вирахована як

$$D_p(t') = \begin{cases} S_p + \frac{S_p * (Per_p / 100) * t_{sp}}{12}, & \text{if } t_p + t_{sp} < t' \\ S_p, & \text{if } t_p + t_{sp} > t' \end{cases} \quad (4)$$

Найкраще рішення  $P^{opt}$  з досягнення фінансової мети пропонується розглядати як задачу векторної оптимізації [3, 10]:

$$P^{opt} = \underset{P \in DP}{\text{extremum}} Q(P),$$

де  $Q$  – функція вибору найкращого плану;  $P$  – множина планів;  $DP$  – множина допустимих планів.

Множина планів  $P = \{P^i\}_{i=1}^n$  визначається як сукупність планів  $P^i = \{P_{kj}^i\}_{j=1, k=1}^{m, n}$ , що складаються

з під цілей  $P_{kj}^i$ .  $P_{kj}^i$  пов'язані в ієрархічну структуру та знаходяться на відповідних рівнях  $k$  планування.

Кожну підціль  $P_{kj}^i$  пропонується розглядати як отримання деякої грошової суми як пасивного доходу від відкриття депозиту. Отже, кожен вузол  $P_{kj}^i$  буде додано у множину графу  $P^i$  на  $k$ -му рівні ієрархії на момент часу  $t_k$  згідно з умовою: якщо  $\exists D_i \in D$ , де  $S_{min}^i < N(t_k)$  та  $t_e - t_k > t_i$ , то робимо вклад  $D_i$  на суму  $S^i = N(t_k) / z$  (якщо  $S_{min}^i \leq N(t_k) / z \leq S_{max}^i$ ,  $z \in \{3, 2, 1\}$ ), та  $N(t_k) := N(t_k) - S^i$ , де  $S^i$  – сума вкладу, яка повинна складати третину від існуючих накопичень,  $t_i$  – термін вкладу,  $t_e$  – кінцевий час планування.

Вузол  $P_{kj}^i$  стає кореневою вершиною графу за умови якщо  $N(t_k) \geq S$  тоді настає кінець побудови плану.

Таким чином, задача побудови планів  $P^i$  буде складатися з формування послідовності вкладів у депозити з множини  $D$  з метою отримати бажану грошову суму  $S$  наприкінці терміну планування найкращим чином.

Для пошуку оптимального плану досягнення фінансової мети  $P^{opt}$  принцип оптимальності  $Q$  оберемо на базі теорії корисності [10, 11], використавши лінійну адитивну згортку з ваговими коефіцієнтами

$$P^{opt} = \max_{i=1, h} \sum_{j=1}^n \alpha_j \beta_j K_j(P^i),$$

де  $\alpha_j$  – нормуючі множники,  $\beta_j$  – вагові коефіцієнти, що відображають відносний внесок окремих критеріїв до загального критерію  $K$ ;  $K_j(P^i)$  – оцінка  $i$ -того плану  $P^i$  за  $j$ -тим критерієм якості.

В якості критеріїв  $K = \{K_j\}_{j=1}^m$  для оцінки якості [12] планів пропонуються наступні критерії:

–  $K_1$  – строк досягнення мети за планом: чим скоріше, тим краще;

–  $K_2$  – складність плану: чим менша кількість вкладів, що входять до плану, тим краще;

–  $K_3$  – надійність плану: чим надійніші банки, в яких пропонується робити вклади за планом, тим краще.

Строк досягнення мети за планом може бути розрахований як

$$K_1(P^i) = t_b + \sum_{k=1}^{h_i} t_s^k,$$

де  $t_b$  – термін початку планування,  $t_s^k$  – строк  $k$ -го вкладу за планом,  $h_i$  – кількість вкладів в плані  $P^i$ . Кількість депозитних вкладів, що входять до плану, можна оцінити як  $K_2(P^i) = h_i$ . Надійність плану може бути оцінена як середнє арифметичне надійності всіх банків, вклади до яких входять до плану:  $K_3(P^i) = \text{average}_{j=1}^{h_i} (Rel_j)$ .

#### 4. Алгоритм планування витрат

На основі запропонованої моделі було розроблено алгоритм планування, що задає процес побудови ієрархічних планів досягнення фінансової мети.

Отже, окремий план із загальної множини планів може мати наступний вигляд (див. рис. 2):

$$P^1 = \{P_{11}^1, P_{12}^1, P_{13}^1, P_{21}^1, P_{31}^1\}$$

Для пошуку кожного вузла  $P_{kj}^i$  графу виконується наступний алгоритм:

**Крок 1:** Перерахунок всіх рахунків  $C(t_k)$ , що існують на момент часу  $t_k$  (де  $k$  – номер циклу алгоритму) у накопичення  $N^l(t_k)$  в необхідній валюті  $l$  згідно з (1) (для  $k = 1, t_1 = t_b, N^l(t_b) = \sum_{j=1}^m (S_j * CUR_j^l)$ ).

**Крок 2:** Перевірка, чи достатньо накопичень  $N^l(t_k)$  для досягнення мети:

2.1 якщо  $N^l(t_k) \geq N^l(t_e) = S$ , то кінець роботи алгоритму;

2.2 інакше, виконуємо наступний крок;

**Крок 3:** Розрахунок можливих термінів вкладів в межах інтервалу планування  $[t_b, t_e]$  та сум вкладів, що разом не перевищують розмір існуючих накопичень  $N^l(t_k)$ :

3.1 вибір терміну  $t_s^k$  вкладу на  $k$ -му циклі: термін планується максимально на рік, якщо дозволяє період планування, або кратним 3-м місяцям за спаданням, тобто 9, 6 або 3 місяці, як це пропонується в депозитних програмах банків, за умов, що на цей термін пропонується максимальна процентна ставка  $Per_x$ , отже:  $t_s^k = 90 * (4 - y)$ , якщо

$$div((t_e - t_b) - \sum_{x=1}^{k-1} t_s^x, (365 - 90 * y)) \geq 90 * (4 - y),$$

де  $y \in \{0, 1, 2, 3\}$ , та  $Per = \max(Per_x)_{x=1}^q$ , де  $q$  – кількість існуючих депозитів із множини  $D = \{D_p\}_{p=1}^q$ ;  $j = 1$ ;

3.2 вибір суми вкладу  $S^k$  на  $k$ -му кроці циклу:  $S^k = \frac{N(t_k)}{z}$ , якщо

$$S_{min}^x \leq \frac{N(t_k)}{z} \leq S_{max}^x, z \in \{1, 2, 3\},$$

де  $x = \overline{1, q}$ , а  $q$  – кількість існуючих депозитів із множини  $D = \{D_p\}_{p=1}^q$ .

**Крок 4:** Побудова підцілей планів  $P^i$  ( $i = \overline{1, h}$ ):

4.1 генерація  $j$ -тих елементів  $P_{kj}^i$   $i$ -тих планів для  $k$ -го кроку алгоритму ( $P^i = \{P_{kj}^i\}_{j=1, k=1}^{m, n}$ : в якості елементу плану обирається депозит на термін та суму, що були раніше вираховані; отже:  $P_{kj}^i = D_p \in D$ , де  $p = \overline{1, q}$   $D_p = \langle S_p, t_p, t_{sp}, Dep_p \rangle$ ; якщо  $S_p = S^k$  та  $t_{sp} = t_s^k$ ;

4.2 перевірка залишку суми накопичення після реалізації  $j$ -тих елементів планів:

4.2.1 якщо  $N^l(t_k) - S^k > 1000$ , то

$$N^l(t_k) := N^l(t_k) - S^k, j := j + 1$$

та переходимо на крок 3.2 для додавання нових  $j$ -тих елементів планів на той же самий термін  $t_s^k$  та нову суму;

4.2.2 інакше, йдемо на крок 5;

**Крок 5:** Перерахунок збережень  $C^l(t_{k+1})$  в  $l$ -ій валюті для наступного  $k+1$  циклу алгоритму з урахуванням прибутку з депозитів  $D(t_k) = \{D_p(t_k)\}_{p=1}^q$   $D(t_k)$  після завершення терміну для вкладів з  $P_{kj}^i$ , ( $D_p(t_k)$  можна вирахувати за формулою (4)), активних доходів  $A^l(t_{k+1}) = \{A_i^l(t_{k+1})\}_{i=1}^m$  ( $A_i^l(t_{k+1})$  розраховується за формулою (2)) та фінансових витрат  $R^l(t_{k+1}) = \{R_i^l(t_{k+1})\}_{i=1}^m$  ( $R_i^l(t_{k+1})$  розраховується за формулою (3)):

$$C^l(t_{k+1}) := C^l(t_k) + A^l(t_{k+1}) - R^l(t_{k+1}) + \sum_{p=1}^h D_p(t).$$

**Крок 6:** Перевірка на досягнення кінця часу планування:

6.1 якщо  $t_{k+1} < t_e$ , то  $k := k + 1$  та повертаємося до кроку 1;

6.2 інакше зберігаємо плани та закінчуємо роботу алгоритму.

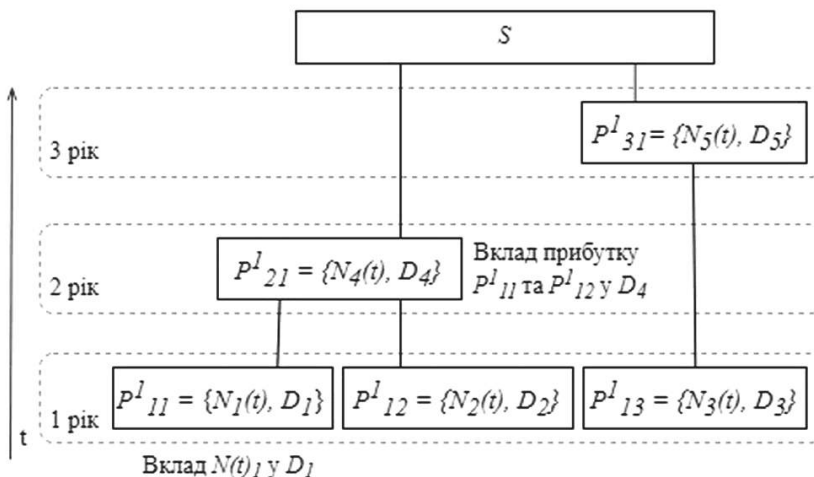


Рис. 2. Фрагмент графу під цілей



### 5. Апробація моделі та алгоритму в системі керування власним бюджетом

Розроблену модель та алгоритм було покладено в основу програмної системи керування власним бюджетом.

Система є зручним інструментом для підтримки процесу обліку бюджету та планування накопичень. Система надає користувачу можливості структурованого зберігання інформації про доходи, витрати, плани та депозити, підтримує автоматичне додавання регулярних доходів чи витрат, розрахунок доходів від депозитів.

Розроблена система реалізує наступні функції:

- додавання нових доходів та витрат;
- додавання інформації про кредити та депозити;
- отримання інформації з сайтів банків про вигідні пропозиції щодо депозитів;
- розрахунок термінів накопичення коштів;
- планування фінансових цілей заданого обсягу і на заданий інтервал часу з урахуванням активних та пасивних доходів;
- перегляд статистичної інформації у вигляді таблиць та графіків;
- робота з кількома рахунками одночасно;
- перерахунок коштів із однієї валюти у іншу за поточним курсом валют.

Систему розроблено за допомогою мови програмування C# за шаблоном MVC. Для зберігання даних використано СКБД Microsoft SQL Server. Технологія доступу до даних — ADO.NET Entity Framework.

Інтерфейс програмної системи дозволяє зручно переглядати історію транзакцій, прогрес планування, прогрес отримання коштів по депозиту, також знаходити, фільтрувати та сортувати необхідну інформацію.

#### Висновки та перспективи

Розроблена модель та алгоритм дозволяють формалізувати процес планування накопичень та були покладена в основу системи керування

власним бюджетом. Суттєво новим в роботі є використання поняття пасивного прибутку від депозиту як основи побудови планів з досягнення фінансової мети. Розроблена система керування власним бюджетом завдяки розширеному функціоналу буде корисна для підтримки грамотного розпорядження власними коштами.

#### Список літератури:

1. Чиненов, М.В. Бюджетное планирование и прогнозирование / М.В. Чиненов — М.: Издательство: «Де-По», 2008. — 118 с.
2. Ларіонов Ю. І. Математичні методи системного аналізу і дослідження операцій / Ю.І. Ларіонов — К.: ІСДО, 1994. 128 с.
3. Введение в нормативную теорию принятия решений. Методы и модели: монография / В.В. Крючковский, Э.Г. Петров, Н.А. Соколова, В.Е. Ходакова; под ред. Э.Г. Петрова. — Херсон : Гринь Д. С., 2013. — 282 с. : іл. — ISBN 978-617-7123-23-0.
4. Brodbeck, F.C., Kugler, K.G., Reif, J.A.M., Maier, M.A. Morals matter in economic games // PLoS ONE. 2013. 8(12), e81558.
5. Айзерман М.А. Выбор вариантов (основы теории) / М.А. Айзерман, Ф.Т. Алескеров. — М. Наука, 1990.
6. Гребенник І. В. Методи підтримки прийняття рішень: навч. посібник / І.В. Гребенник, Т.Є. Романова, А.Д. Тевяшев, Г.М. Яськов; МОН України, Харк. нац. ун-т радіоелектроніки. — Харків: ХНУРЕ, 2010. — 127 с.
7. Reichert, P., Langhans, S.D., Lienert, J., Schuwirth, N. The conceptual foundation of environmental decision support // Journal of Environmental Management. 2015. 154, pp. 316-332.
8. Fuzzy multiple attributes and multiple hierarchical decision making / Cheng-Chuang Hon, Yuh-Yuan Guh, Kou-Ming Wang, E. S. Lee — Computers & Mathematics with Applications, Volume 32, Issue 12, December 1996, Pages 109-119.
9. Соболев И.М., Статников П.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями, Дрофа 2006.
10. Witt, U. The transformations of utility theory: a behavioral perspective / Journal of Bioeconomics. 2016. 18(3), pp. 211-228.
11. Milan Zeleny, Multiple Criteria Decision Making (MCDM): From Paradigm Lost to Paradigm Regained? / Journal of Multi Criteria Decision Analysis, 2011, Volume 18, Issue 1-2.
12. Labreuche, C. A general framework for explaining the results of a multi-attribute preference model // Artificial Intelligence. 2011. 175(7-8), pp. 1410-1448.

Надійшла до редколегії 16.02.2018

УДК 004.912

С.Г. Удовенко<sup>1</sup>, В.А. Затхей<sup>1</sup>, О.В. Тесленко<sup>1</sup><sup>1</sup>Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця,  
Харків, serhiy.udovenko@hneu.net

## МОДЕЛЮВАННЯ МІМО-СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

Наведено результати дослідження впливу розмірів пакетів на характеристики системи МІМО передачі даних в інфокомунікаційних мережах при допустимому поєднанні передатчиків і приймачів. Для проведення досліджень обрана модель бездротової мережі, що реалізована за допомогою засобів MATLAB та методу просторово - часового кодування Аламоуті.

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНА МЕРЕЖА, МОДЕЛЮВАННЯ, МЕТОД АЛАМОУТІ, MATLAB, МІМО-СИСТЕМА

**Удовенко С.Г., Затхей В.А., Тесленко О.В. Моделирование МІМО-системы передачи данных в инфокоммуникационных сетях.** Приведены результаты исследования влияния размеров пакетов на характеристики системы МІМО передачи данных в инфокоммуникационных сетях при допустимом сочетании передатчиков и приемников. Для проведения исследований выбрана модель беспроводной сети, реализованной с помощью средств MATLAB и метода пространственно-временного кодирования Аламоуті.

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНА МЕРЕЖА, МОДЕЛЮВАННЯ, МЕТОД АЛАМОУТІ, MATLAB, МІМО-СИСТЕМА

**Udovenko S.G., Zathay V.A., Teslenko O.V. Simulation of mimo-data transfer systems in infocommunication networks.** The results of research on the influence of packet sizes on the characteristics of the MIMO system of data transmission in infocommunication networks with the admissible combination of transmitters and receivers are given. For conducting researches, the wireless network model implemented using MATLAB tools and the Alamouti spatial - temporal coding method was chosen.

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНА МЕРЕЖА, МОДЕЛЮВАННЯ, МЕТОД АЛАМОУТІ, MATLAB, МІМО-СИСТЕМА

### Вступ

У сфері інформаційних мереж і комунікацій останнім часом все більше поширення знаходять бездротові технології. Це обумовлено як новими розробками в цій галузі, так і своєчасними зусиллями органів стандартизації. Нові розробки ведуться в цілому ряді напрямків: поліпшуються антенні системи, схеми модуляції, комунікаційні компоненти, механізми управління доступом до середовища, безпека комунікацій тощо [1]. В останні роки сформувався поняття специфічного класу інформаційних мереж, які визначаються як інфокомунікаційні мережі [2].

Термін «інфокомунікація» має бінарний характер (information, communications). Інформація (information) сьогодні розглядається як специфічний ресурс, що має низку ознак, які відрізняють його від інших ресурсів розвитку суспільства. З іншого боку, для забезпечення доступу користувачів до цього ресурсу потрібно підтримувати телекомунікаційний зв'язок (communication) між терміналом користувача і транспортною мережею, що об'єднує різні компоненти інформаційних ресурсів. Накопичення ж інформації, її обробка та систематизація в територіально розподілених базах даних, а також інформаційний обмін припускають наявність мережових структур і програмного забезпечення, що дозволяє погоджувати в реальному часі функціонування різноманітних пристроїв, задіяних в процесі обміну.

В роботі [2] інфокомунікаційна мережа (Infocommunication Network) визначається як сукупність територіально розосереджених інформаційних, обчислювальних ресурсів, програмних комплексів управління, що розміщуються в кінцевих системах мережі і термінальних системах користувачів, взаємодія між якими забезпечується за допомогою телекомунікацій, і які спільно утворюють єдину мультисервісну платформу.

Важливою перевагою сучасних інфокомунікаційних технологій є можливість збільшення пропускної здатності, ємності і надійності мережі паралельно зі збільшенням кількості передавальних і приймальних антен. Інфокомунікаційні технології дозволяють вирішити такі проблеми як інтерференція, втрати при поширенні радіохвиль, завмирання сигналу, затінення і екранування. Завдяки своїм перевагам ці технології мають неабиякі перспективи, але повинні постійно вдосконалюватися. Тому питанням їх дослідження, зокрема моделювання мереж передачі даних, необхідно приділяти належну увагу.

Мережі з комутацією пакетів, в яких реалізовані методи забезпечення якості обслуговування, дозволяють передавати різні види трафіку, в тому числі телефонний і комп'ютерний. Тому методи комутації пакетів сьогодні вважаються найбільш перспективними для побудови конвергентної мережі, яка забезпечить комплексні якісні послуги для абонентів будь-якого типу. Важливим

завданням для проектувальників і користувачів комп'ютерних систем і мереж є розробка нових методів забезпечення необхідної якості обслуговування QoS (Quality of Service), які дозволили б мінімізувати рівень затримок для чутливого до них трафіку [3]. Актуальним є аналіз проблеми комутації пакетів в комп'ютерних мережах і застосування сучасних засобів дослідження основних характеристик передачі даних в інфокомунікаційних багатоканальних системах.

Основною метою роботи є дослідження впливу розмірів пакетів на характеристики системи МІМО при допустимому поєднанні передатчиків і приймачів. Для проведення досліджень була обрана модель бездротової радіомережі, що реалізована за допомогою засобів MatLab System. У будь-якому кадрі система працює з однією, двома, трьома або чотирма передавальними або приймальними антенами.

**1. Характеристика методів просторово-часового кодування**

У системах МІМО застосовуються різні методи і алгоритми, що діють за принципом просторово-часового кодування, які необхідно, шляхом моделювання, порівняти між собою і, потім, цілеспрямовано досліджувати та удосконалювати найбільш ефективні з них [4].

Основною ідеєю МІМО є формування паралельних потоків даних із загального потоку на вході і пересилку їх на незалежні приймачі, які забезпечують паралельну передачу даних в смузі радіочастот, що використовується в повній мірі одночасно (в один і той же момент часу) кожним приймачем. В цьому випадку пропускна здатність може бути збільшена без додаткового розширення смуги радіочастот, або підвищення ефективної випромінюваної потужності передавальних трактів каналу. Так як для передачі потоків даних використовується одна і та ж смуга радіочастот, потоки необхідно декорелювати, тобто забезпечити їх взаємну незалежність

Декореляція забезпечується організацією паралельних некорельованих каналів за допомогою просторового рознесення елементів передавальної і приймальної антенних решіток на відстань близько декількох довжин хвиль несучої частоти, що може бути реалізовано в використовуваних в даний час і перспективних стандартах бездротового зв'язку. Відповідно, для реалізації методу потрібна наявність більше одного приймально-передавального тракту (зазвичай двох і більше) в складі абонентської станції (АС) та базової станції (БС).

Розглянемо особливості деяких сучасних методів просторово-часового кодування, що застосовуються в інфокомунікаційних системах. Одним з найбільш поширених алгоритмів, просторово-часового блокового кодування є алгоритм MRC (Maximal Ratio Combining) [5]. Слід зазначити, що використання рознесенного прийому на АС

збільшує їх складність, тому методи рознесенного прийому доцільніше використовувати на стороні БС.

Розглянемо алгоритм MRC на прикладі системи з однією передавальною і двома прийомними антенами (система 1×2). В деякий момент часу  $x$  передається сигнал  $x$ , який проходить по двом просторовим каналам з коефіцієнтами передачі  $h_1$  і  $h_2$ , утворюючи матрицю комплексних канальних коефіцієнтів  $H$ . До прийнятих сигналів додається шум, комплексні відліки якого  $n_1$  та  $n_2$  утворюють матрицю відліків шумів  $N$ . Прийняті сигнали можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} y_1 = h_1 x + n_1 \\ y_2 = h_2 x + n_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \Rightarrow Y = Hx + N$$

Відновлене значення переданого сигналу  $\tilde{x}$  визначається таким чином:

$$\tilde{x} = \frac{h_1^H y_1 + h_2^H y_2 - h_1^H n_1 - h_2^H n_2}{h_1^H h_1 + h_2^H h_2}$$

Значення  $\tilde{x}$  подається на детектор максимальної правдоподібності, в якому на основі евклидової відстані між  $\tilde{x}$  і множиною можливих для передачі сигналів визначається найбільш правдоподібний переданий сигнал. Спрощене правило рішення засноване на виборі, якщо дотримується умова

$$dist(\tilde{x}, x_i) \leq dist(\tilde{x}, x_j); i \neq j$$

Найбільш правдоподібно переданим сигналом є сигнал, що має мінімальну евклідову відстань від сигналу. Припустимо, що передається  $k$  символів за  $l$  моментів часу. Отже, швидкість просторово-часового коду визначається як  $R = k / l$ . Для методу MRC  $R=1$ , тобто за один момент часу відновлюється один переданий символ. Розглянемо просторово-часовий блоковий алгоритм Аламоуті на прикладі системи з двома передавальними і однією приймальною антенами (система 2×1) [6].

Матриця передачі для цієї системи визначається наступним чином:

$$G_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix}$$

Процес кодування і передачі відбувається відповідно до таблиці 1.

**Таблиця 1**  
**Кодування та схемою Аламоуті (2×1)**

Часовий слот	Антенa 1	Антенa 2
1	$x_1$	$x_2$
2	$-x_2^*$	$x_1^*$

Значення коефіцієнтів  $h_1$  і  $h_2$  мають бути постійними протягом двох послідовних тимчасових слотів. Прийняті сигнали можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} y_1 = h_1 x_1 + h_2 x_2 + n_1 \\ y_2 = -h_1 x_2^H + h_2 x_1^H + n_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^H & -h_1^H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}$$

Відновлені сигнали визначаються таким чином:

$$\tilde{x}_1 = \frac{h_1^H y_1 + h_2 y_2^H - h_1^H n_1 - h_2 n_2^H}{h_1^H h_1 + h_2^H h_2},$$

$$\tilde{x}_2 = \frac{h_2^H y_1 - h_1 y_2^H - h_2^H n_1 + h_1 n_2^H}{h_1^H h_1 + h_2^H h_2}.$$

Значення  $\tilde{x}_1$  та  $\tilde{x}_2$  подаються на детектор максимальної правдоподібності. Для розглянутого методу  $R=1$ .

Розглянемо схему просторово-часового кодування з використанням методу мінімізації середньоквадратичної помилки (MMSE) між вхідними та відновленими сигналами системи передачі [7]. Рішенням цього методу є матриця наступного вигляду:

$$V = [H^H H + \alpha I_{N_t \times N_t}]^{-1} H^H,$$

де  $\alpha$  – параметр регуляризації, що визначається наступним чином:

$$\alpha = Nt \frac{\sigma_n^2}{P} = \frac{Nt}{SNR},$$

де  $Nt$  – кількість передавальних антен;  $\sigma_n^2$  – дисперсія шуму;  $P$  – середня потужність;  $SNR$  (Signal Noise Ratio) – відношення дисперсії шуму до середньої потужності.

Відновлені сигнали визначаються таким чином:

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} = [H^H H + \alpha I_{N_t \times N_t}]^{-1} H^H \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}.$$

Для розглянутого методу  $R=2$ .

Існують також інші методи просторово-часового кодування, зокрема: ZF, D-Blast, V-Blast тощо [5].

## 2. Опис MIMO моделі

Досліджувана модель базується на застосуванні методу Аламоуті з використанням  $M$  передавальних і  $N$  прийомних антен (де  $M, N = 1, 2, 3, 4$ ), що дозволяє отримувати ефективні параметри передачі та підвищувати її завадостійкість. На рис. 1 наведена запропонована структура цієї моделі,

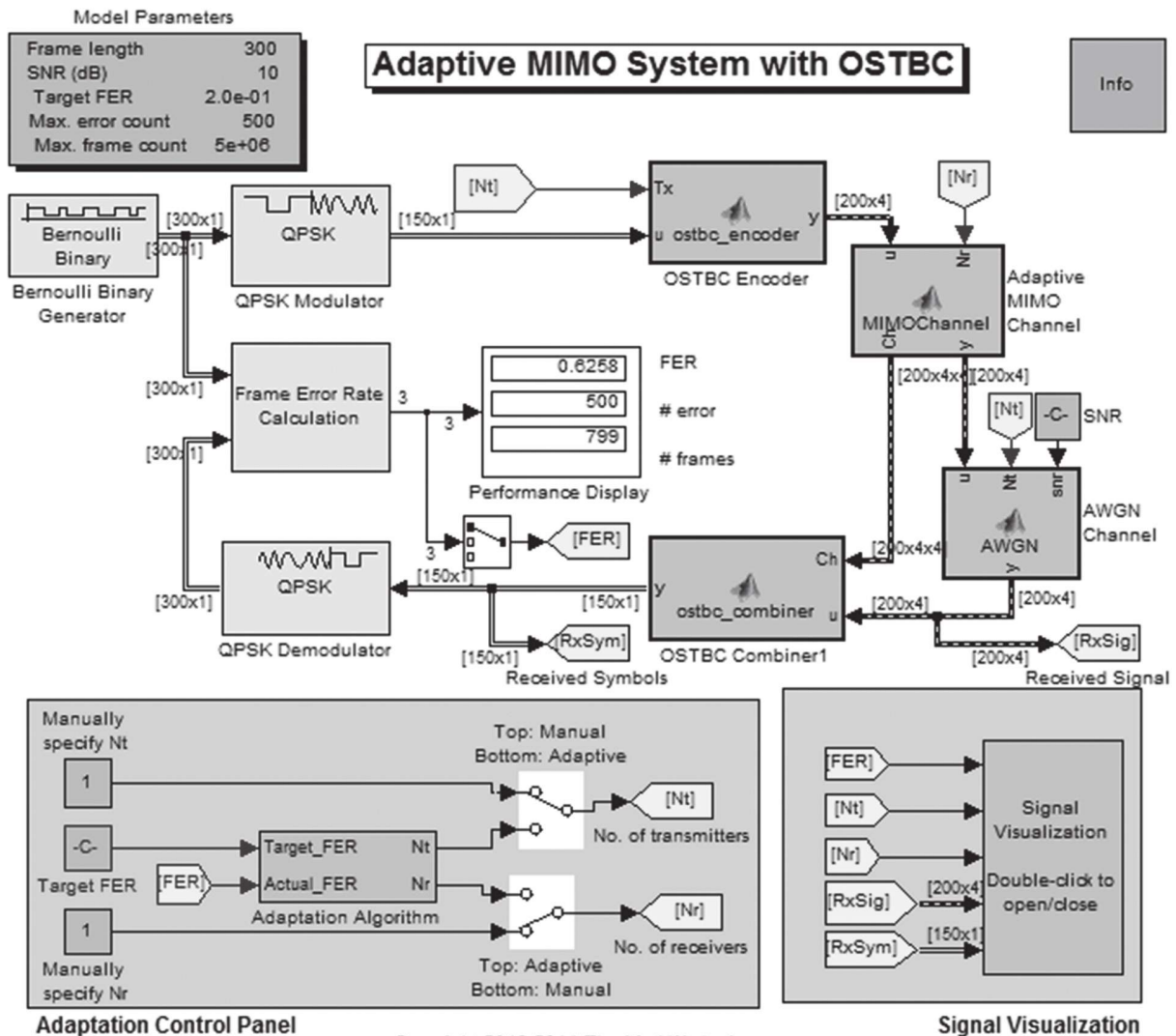


Рис. 1. Модель MIMO-системи передачі даних

реалізована за допомогою засобів MatLab System, а саме тулбоксу Communications System Toolbox, що містить алгоритми та інструменти для розробки, моделювання та аналізу систем зв'язку [8]. Ці можливості реалізовані у вигляді системних об'єктів і функцій MATLAB і блоків, які дозволяють реалізовувати алгоритми каналного кодування і кодування джерела, модуляції, стабілізації, синхронізації, а також моделі каналів зв'язку. Адаптивні алгоритми, що входять до Communications System Toolbox, дозволяють моделювати динамічні системи зв'язку, в яких застосовуються такі техніки як OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів), OFDMA і MIMO (multiple input / multiple output – кілька входів / кілька виходів). Розглянемо основні компоненти моделі, що досліджуються в даній роботі.

Блок «Генератор випадкових двійкових чисел (Bernoulli Binary Generator)» генерує кадр випадкових бітів та є джерелом інформації для моделювання. Параметр довжини кадру (Frame Length) визначає довжину вихідного кадру. Блок генерує випадкові двійкові числа за розподілом Бернуллі. Якщо параметр розподілу Бернуллі вибирається як ймовірність  $p$ , то блок виробляє «0» з ймовірністю  $p$  і «1» з ймовірністю  $1 - p$ . Блок генерує кадр з 300 або 3000 випадкових бітів в залежності від вимог завдання. Тип вихідних даних – «Boolean».

Блок «OSTBC (Orthogonal space-time block codes)» є датчиком ортогональних кодів, що кодує інформаційні символи з модулятора QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) з використанням коду Аламоуті для двох, трьох або чотирьох передавальних антен або інших узагальнених комплексних ортогональних кодів. Число передавальних антен в цьому блоці є важливим вхідним параметром. На виході цього блоку ( $N_t N_r$ ) формується матриця змінного розміру, де кількість стовпців  $N_t$  відповідає кількості передавальних антен, а кількість рядків  $N_r$  – кількості приймальних антен. Цей функціональний блок є об'єктом системи в загальній схемі MIMO-моделювання алгоритмів кодування для обраної кількості передавальних та приймальних антен. Демодулятор QPSK розпізнає вихід блоку OSTBC, який є відновленим сигналом з розміром, рівним половині вхідного.

Блок «AMC (Adaptive MIMO Channel)» здійснює адаптацію MIMO каналу, що імітує частотно-кватратний розподіл Релея згасання MIMO каналу від  $N_t$  передавальних антен до  $N_r$  прийомних антен. Блок об'єднує просторово незалежні  $4 \times 4$  MIMO канали з передавальною і приймальною сторони вибору антен. Перший вхід цього блоку ( $N_t \times N_r$ ) є матрицею змінного розміру, де кількість колонок ( $N_t$ ) відповідає кількості окремих передавальних антен, а кількість рядків ( $N_r$ ) відповідає числу приймальних антен.

Блок «AWGN (Add white Gaussian noise to signal)» додає білий шум до дійсної або комплексної складової вхідного сигналу на прийомній стороні системи, що підтримує сигнали змінної довжини. Коли вхідний сигнал є реальним, цей блок додає реальний гауссівський шум і виробляє реальний вихідний сигнал. Якщо вхідний сигнал є комплексним, цей блок додає комплексний гауссів шум і виробляє комплексний вихідний сигнал відповідно. Блок AWGN бере час вибірки зі вхідного сигналу. Перший вхід цього блоку є перший виходом блоку MIMO каналу. Другий вхід цього блоку є дисперсією шуму, яка обчислюється з урахуванням числа передавальних антен ( $N_t$ ), а на третій вхід подається значення SNR.

Блок «FERC (Frame Error Rate Calculation)» є підсистемою розрахунку показника FER, що обчислюється як відношення кількості кадрів з помилками до загальної кількості оброблених кадрів в одному експерименті з моделювання каналної передачі даних в MIMO-системі. Цей блок порівнює декодовані біти з бітами на вході кадрів для виявлення помилок і динамічно оновлює вміст вікон вихідного дисплея (Performance Display). Виходом блоку є вектор з трьох елементів: FER, кількість фреймів з помилками і кількість оброблених фреймів. Модель перевіряє параметр моделювання Стоп (Max error count), щоб контролювати тривалість моделювання. Симуляція зупиняється при виявленні заданої кількості кадрів з помилками.

### 3. Результати моделювання

Для проведення досліджень була обрана модель мережі MIMO, наведена на рис. 1. Необхідні для моделювання співвідношення кількості передавальних і приймальних антен задаються на панелі управління моделі у відповідних вікнах  $N_t$  та  $N_r$ . Метою моделювання було дослідження впливу розміру пакетів на такі характеристики функціонування системи бездротової мережі передачі даних MIMO як рейтинг системи та продуктивність бездротової мережі. Для дослідження моделі були обрані такі значення вхідних параметрів: розміри фреймів – 300 байт і 3000 байт; SNR – 10 dB.

Результати моделювання для розмірів пакетів 300 байт та 3000 байт наведено відповідно в таблицях 2 та 3. На таблицях позначено:  $K_1$  – кількість передавальних антен;  $K_2$  – кількість приймальних антен.

На рис. 2 та 3 наведено рейтинг системи MIMO з різною кількістю передавальних і приймальних антен ( $N_t, N_r = 1, 2, 3, 4$ ). Рейтинг системи MIMO істотно залежить від кількості антен на передавачі і приймачі. Результати дослідження показали, що найкращий рейтинг система має, коли  $N_t = N_r = 4$ .

Оцінка FER обчислюється як відношення кількості фреймів з помилками до загальної кількості оброблених фреймів в одному експерименті. Чисельні значення цього параметра наведені в стовпчиках 3 і 5 табл. 1 і на малюнках 3а) і 3б).

Таблиця 2

**Результати моделювання (1)**

K1	K2	Розмір пакету 300 байт	
		FER	Frames
1	1	0.652	229800
	2	0.783	191400
	3	0.825	181800
	4	0.892	168000
2	1	0.379	394800
	2	0.435	344100
	3	0.497	301800
	4	0.493	304200
3	1	0.241	621900
	2	0.249	600900
	3	0.256	585300
	4	0.258	581100
4	1	0.170	879600
	2	0.157	955500
	3	0.148	1011300
	4	0.143	1046400

Таблиця 3

**Результати моделювання (2)**

K1	K2	Розмір пакету 3000 байт	
		FER	Frames
1	1	0.907	1653000
	2	0.980	1530000
	3	0.994	1509000
	4	0.996	1506000
2	1	0.716	2094000
	2	0.809	1854000
	3	0.877	1710000
	4	0.909	1650000
3	1	0.63	2367000
	2	0.678	2211000
	3	0.717	2091000
	4	0.768	1953000
4	1	0.508	2949000
	2	0.561	2673000
	3	0.584	2565000
	4	0.568	2640000

Порівняльний аналіз результатів моделювання свідчить про те, що рейтинг фреймів з розмірі 3000 природно вище при будь-якому поєднанні передавальних і приймальних антен. У цьому випадку передача даних вимагає великих витрат часу в порівнянні з передачею фреймів розміром в 300 байт і ймовірність появи помилкових біт в фреймі розмірі 3000 байт вище. На рис. 3 представлені результати моделювання МІМО системи з використанням фреймів розміром 300 байт. З рисунка видно, що навіть при роботі тільки одного передавального пристрою рейтинг системи змінюється від 0.64 до 0.91, що значно менше, ніж значення цієї характеристики для фреймів розміром 3000 байт.

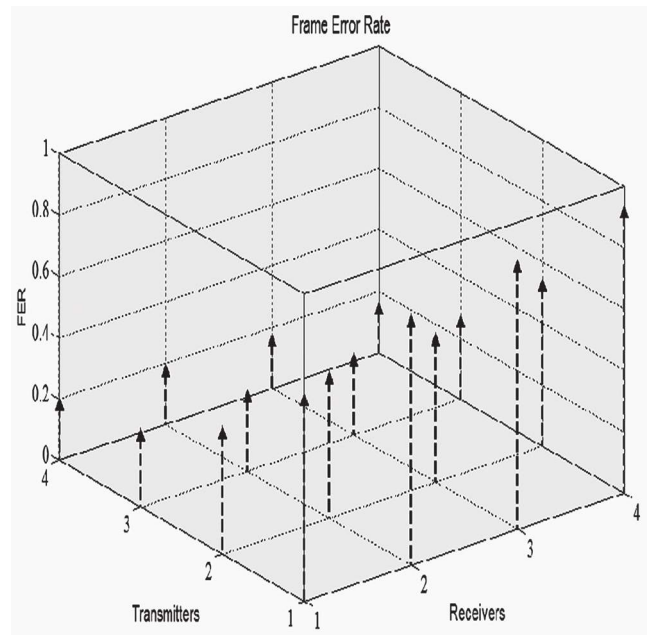


Рис. 2. Рейтинг МІМО-системи передачі даних (розмір фреймів 300 байт)

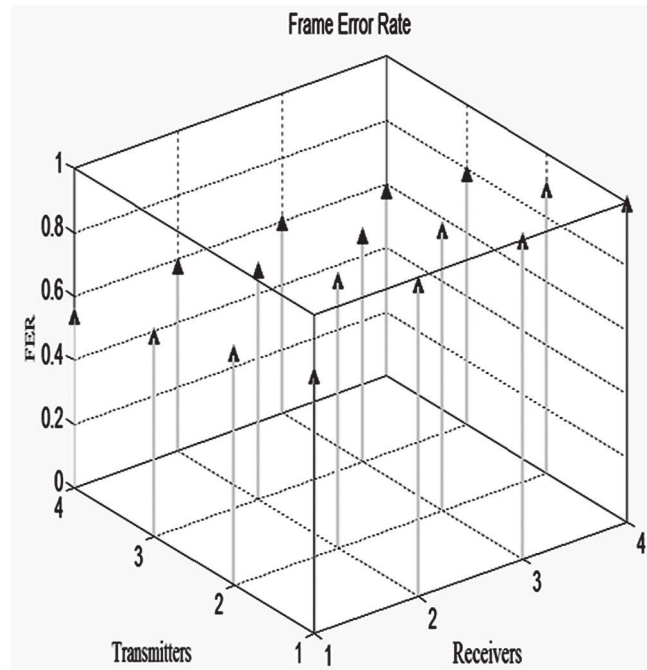


Рис. 3. Рейтинг МІМО-системи передачі даних (розмір фреймів 3000 байт)

Для мережевих фахівців важливою характеристикою будь-якої мережі є її пропускна здатність (throughputs). При використанні в контексті мереж зв'язку, пропускна здатність мережі – це швидкість успішної доставки повідомлень по каналу зв'язку. Якщо мережа має кілька послідовних ланок з різними бітрейтами, максимальна пропускна здатність загального каналу нижча або дорівнює найнижчій швидкості передачі даних.

Пропускна здатність зазвичай вимірюється в бітах за секунду (біт / с або bps), а іноді в пакетах даних за секунду (p / s або pps) або пакетах даних на часовий проміжок часу. Під корисною пропускною здатністю розуміють швидкість передачі

даних користувачів, які переносяться полем даних кадру.

Тому наступне дослідження моделі мережі було присвячено впливу розміру пакету на корисну пропускну здатність МІМО мережі. З цією метою в таблиці 2 та 3 в останні стовпці були занесені фрейми для пакетів 300 і 3000 байт відповідно, що характеризують пропускну здатність кожного розміру МІМО мережі. З використанням цих даних були отримані характеристики корисної пропускну здатності ( $p/s$ ) каналу МІМО (для різних значень  $K1$  та  $K2$ ) при передачі фреймів різних розмірів. Відповідні результати наведені в табл. 3 (для розміру фреймів 3000) та в табл. 4 (для розміру фреймів 300).

Таблиця 3

Корисна пропускну здатність (для розміру фреймів 3000)				
K1 \ K2	1	2	3	4
1	1.53	1.51	1.5	1.49
2	2.16	1.8	1.7	1.61
3	2.35	2.23	2.1	1.9
4	2.9	2.68	2.51	2.6

Таблиця 4

Корисна пропускну здатність (для розміру фреймів 300)				
K1 \ K2	1	2	3	4
1	0.25	0.21	0.2	0.19
2	0.4	0.36	0.32	0.32
3	0.62	0.61	0.6	0.58
4	0.8	0.9	1.05	1.1

Дані таблиць 3 та 4 свідчать про те, що для конкретних умов експлуатації інфокомунікаційних мереж (для різних розмірів пакетів) можна визначити (за результатами МІМО-моделювання з використанням методів просторово-часового кодування) оптимальні співвідношення  $K1$  ( $Nt$ ) та  $K2$  ( $Nr$ ), що дозволяють теоретично отримати найвищу корисну здатність системи передачі даних.

## Висновки

В роботі наведено результати дослідження впливу розмірів пакетів на характеристики системи МІМО передачі даних в інфокомунікаційних мережах при допустимому поєднанні передатчиків і приймачів. Для проведення досліджень була обрана модель бездротової мережі, що реалізована за допомогою засобів MATLAB та методу просторово-часового кодування Аламоуті. Виконані дослідження з визначення рейтингу і пропускну здатності системи МІМО показали, що перехід від SISO системи до МІМО системи збільшує пропускну здатність і значно підвищує рейтинг системи. Отримано рекомендації з підвищення корисної пропускну здатності комунікаційних мереж за різних умов передачі даних. Слід також зазначити, що представлені в пакеті MATLAB блоки побудови моделей продемонстрували задовільну відповідність теоретичних передумов і отриманих результатів моделювання.

## Список літератури:

1. *Голдсмит А.* Беспроводные коммуникации / А. Голдсмит ; пер. с англ. Н.Л. Бирюкова, Н.Р. Триски; под ред. В.А. Березовского. – М.: Техносфера, 2011. – 903 с.
2. *Воробийенко П.П.* Инфокоммуникационные технологии: термины и определения / П.П. Воробийенко, Л.А. Никитюк // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 6 (54). – С. 4–6.
3. *Гулиус В.А.* Имитационное моделирование пакетной сетевой коммутации для разных дисциплин обслуживания / В.А. Гулиус, С.Г. Удовенко, А.А. Шамраев // Системы обработки информации. – 2013. – Вип. 7(114). – С. 65–70.
4. *Бакулин М.Г.* Технология МІМО: принципы и алгоритмы / М.Г. Бакулин, Л.А. Варукина, В.Б. Крейнделлин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 242 с.
5. *Прокис Дж.* Цифровая связь. Пер. с англ. / Дж. Прокис. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
6. *Alamouti S.M.* Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications / S.M. Alamouti // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2008. – vol. 16, pp. 1451–1458.
7. *Benslama M.* Ad Hoc Networks Telecommunications and Game Theory / M. Benslama, M.L. Boucenna, H. Batatia. – London SW19 4EU UK ISTE: Ltd John Wiley & Sons, Inc. 27-37 St.George's Road, 2015. – 141 p.
8. *Paulraj A.J.* An Overview of MIMO Communications – A Key to Gigabit Wireless / A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, H. Bolcskei. // Proc. Of the IEEE – February 2004. – Vol. 92, No. 2 – P. 198–218.

Надійшла до редколегії 14.03.2018

УДК 004.827+004.89



З.Л. Рибчак

Національний університет «Львівська Політехніка»,  
м. Львів, Україна zoriana.rybchak@gmail.com

## МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАНУ ПЕРШОЧЕРГОВОСТІ РЕМОНТУ ДОРІГ В МЕЖАХ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ

В роботі запропоновано розв'язання задачі ефективного розподілу коштів для ремонту доріг на кількарічний період. Розглянуто моделювання ремонту доріг територіальної громади при наявності коштів та в залежності від стану доріг. Для моделювання запропоновано використати метод пошуку мінімального кістякового дерева на основі модифікації алгоритму Пріма.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ГРАФ, АЛГОРИТМ ПРИМА, КІСТЯКОВЕ ДЕРЕВО, ТЕРИТОРІАЛЬНА ГРОМАДА, НАСЕЛЕНИЙ ПУНКТ

**Rybchak Z. Methods and means of modeling the plan for priority repair of roads within the territorial community.** The paper proposes the solution of the problem of efficient allocation of funds for repair of roads for a period of several years. The simulation of the repair of the roads of the territorial community with the availability of funds and depending on the state of roads is debated. For modeling, it is proposed to use the search method for the minimal skeletal tree based on the modification of the Prima algorithm..

MATHEMATICAL MODELING, GRAPH, ALGORITHM PRIMA, CASTLE TREE, TERRITORIAL COMMUNITY, POPULATION ITEM

**Рибчак З.Л. Методы и средства моделирования плана первоочередности ремонта дорог в пределах территориальной общины.** В работе предложено решение задачи эффективного распределения средств для ремонта дорог на многолетний период. Рассмотрено моделирование ремонта дорог территориальной общины при наличии средств и в зависимости от состояния дорог. Для моделирования предложено использовать метод поиска минимального скелетного дерева на основе модификации алгоритма Прима.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ГРАФ, АЛГОРИТМ ПРИМА, ОСТОВНОЕ ДЕРЕВО, ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЕ ОБЩИНЫ, НАСЕЛЕННЫЙ ПУНКТ

### Вступ

На сьогодні в Україні спостерігається тенденція до децентралізації влади і об'єднання декількох населених пунктів, формуючи таким чином спроможну територіальну громаду (ТГ). Парламентом 5 лютого 2015 року було схвалено Закон України «Про добровільне об'єднання територіальних громад» [1], а Урядом, для забезпечення його реалізації, затверджено Методику формування спроможних територіальних (постанова Кабінету Міністрів України № 214 від 08.04.2015) [2]. Яким чином має відбуватись об'єднання громад для того, щоб вони стали спроможними, визначають активи затвержені у Методиці формування.

Схвалюючи перспективний план формування спроможної територіальної громади та здійснюючи розподіл ресурсів між громадами, робочим групам слід керуватись затвердженою Методикою формування спроможних ТГ. Таким чином, враховуючи фінансове забезпечення, громада зможе самостійно або через відповідні органи місцевого самоврядування забезпечувати належний рівень надання послуг, зокрема, у сфері освіти, культури, охорони здоров'я, соціального захисту, житлово-комунального господарства [2].

Практична реалізація процесу об'єднання територіальних громад розпочалась в середині 2015 року. У 2015 році було утворено 159 ОТГ, що об'єднали 793 територіальні громади

У 2016 році відбувся суттєвий прогрес у формуванні ОТГ – їхня кількість зросла у 2,3 рази. Таким чином, станом на початок 2017 р. в Україні налічувалось 366 ОТГ, які об'єднали 1740 місцевих рад, в яких проведено перші місцеві вибори.

У 2017 році після прийняття низки законів, що врегулювали проблемні питання об'єднання, процес формування ОТГ отримав новий імпульс до активізації. 30 квітня 2017 року відбулись перші місцеві вибори ще у 47 ОТГ.

Таким чином, станом на кінець травня 2017 року в Україні утворено 413 ОТГ, що об'єднали 5258 населених пунктів, і в яких відбулись перші вибори органів місцевого самоврядування [17].

Станом на сьогодні в Україні утворено 705 ОТГ (рис. 1.1), у яких відбулись перші вибори та 126, які очікують рішення про призначення

перших виборів. Складовою територіальних громад (ТГ) є населений пункт (НП), тобто  $ТГ = \{НП_1, НП_2, \dots, НП_N\}$ . Виникає проблема дорожнього зв'язку між центром ТГ та її НП. Очевидно, що окремі НП зв'язані між собою дорогами (у цій роботі розглянуті лише автомобільні дороги). Стан 95% автодоріг — непридатні для використання. Оскільки протягом кількох останніх років, а подекуди — й більше, витрати на ремонт і будівництво автомобільних шляхів в Україні не забезпечували відновлення їх належного стану. Утім, слід наголосити, що останніми роками уряд



суттєво збільшив витрати на ремонт і будівництво автомобільних шляхів та взявся за наведення ладу в автодорожньому господарстві. Однак, враховуючи застарілість цієї проблеми і масштаби країни, стає очевидним, що розв'язання проблем, накопичених у цій сфері української економіки, вимагатиме величезних коштів протягом вельми значного періоду часу [3].

Все це зумовлює актуальність теми дослідження та розв'язання задачі ефективного розподілу коштів для ремонту доріг на кількарічний період.

### 1. Аналіз останніх досліджень і публікацій Постановка задачі

На сьогодні реформа децентралізації отримала доволі широку підтримку громадськості та експертного середовища України.

Більшість територіальних громад України, маючи право вирішувати питання місцевого значення, неспроможна їх виконувати через брак власних коштів, занепад або відсутність інфраструктури (необхідних будівель, споруд, доріг тощо), а також брак кадрів відповідної кваліфікації.

Метою закону є добровільне об'єднання територіальних громад, які здатні самостійно вирішувати питання розвитку своїх територій, створення спроможних територіальних громад, які в інтересах місцевого населення безпосередньо та через органи місцевого самоврядування на підставі закону можуть здійснювати регулювання і управління істотною частиною суспільних справ, що належать до їхніх повноважень. Закон передбачає, що територіальні громади, наділені достатніми фінансовими, інфраструктурними та кадровими ресурсами, надаватимуть якісні послуги у сфері освіти, культури, медицини, соціального захисту, житлово-комунального господарства, забезпечення охорони громадського порядку тощо.

Під час децентралізації влади та проведення адміністративно-територіальних реформ в різних країнах виникають різні не вирішені задачі. Тому проблема даного дослідження ще ніким не вирішена. При ОДА були сформовані громадські організації, які б мали виробити методику формування територіальної громади.

### 2. Постановка задачі

У реальній практиці досить важко сформувавши спроможну громаду через наявність багатьох ключових факторів формування громади: неможливість забезпечення на належному рівні надання вторинної медичної допомоги та спеціалізованої освіти; потреба в приміщеннях для розміщення установ; складне географічне положення, яке має враховувати щоденні міграції мешканців в межах зони доступності адміністративного центру.

Тому на сьогоднішній день основними проблемами реформи є:

1. Правильний розподіл ресурсів для мінімізації фінансування з боку держави;

2. Організація перспективних планів об'єднання у всіх районах України з визначенням потенційного центру громади із врахуванням доступності послуг у відповідних сферах на території спроможної ТГ та з умовою наявності середньої школи і амбулаторії в зоні доступності.

Порушення методики формування може призвести до непередбачуваного обороту фінансів у громаді, а також до виникнення «білих плям» — це випадки, коли зона доступності до потенційних центрів не покриває всю територію області. Відстань від центру громади до її найвіддаленішого населеного пункту має бути такою, щоб у екстрених випадках її не довше ніж за 30 хвилин могли подолати пожежна команда, швидка допомога, поліцейський патруль. Допомога, що буде надана через більший проміжок часу різко втрачає ефективність.

Не вирішеною на сьогодні є задача моделювання плану ремонту доріг. Задачу можна вирішити модифікувавши алгоритм Пріма. Дослідженнями оптимізації та модифікації алгоритму Пріма займалися Свами М., Макконелл Дж., Копилова В., Титенко С. та інші [8].

Алгоритм Пріма поступово будує шуканий мінімальний остов, додаючи до нього по одному ребру на кожному кроці. На початку роботи алгоритму результуюче дерево складається з однієї вершини, її обираємо довільно. Алгоритм складається з  $N-1$  ітерацій, на кожній з яких до дерева додається рівно одне ребро, не порушуючи властивості дерева. Основний момент — з усіх таких ребер кожен раз вибирається ребро з мінімальною вагою.

Якщо для алгоритму Пріма додати ще один ітераційний процес, метою якого буде зменшення розмірності початкового графу за рахунок відкидання ребер, які не будуть відображені у кінцевому дереві. Потрібно обов'язково перевірити, щоб при відкиданні у графа не з'являлись ізольовані вершини. Складність запропонованого алгоритму в  $n$  разів більша за алгоритм Пріма, оскільки додається ще один цикл, тобто становитиме  $O(n^2 \cdot \ln n)$ .

### 3. Основні результати досліджень

Для розв'язку задачі ефективного розподілу коштів для ремонту доріг на кількарічний період, необхідно знати стан дороги та її покриття, підпорядкованості дороги та виділено на ремонт бюджету.

Дорогу між двома різними населеними пунктами (НП) будемо розглядати як окрему дорогу.

Якщо є розвилки доріг поза межами НП, то в місці такої розвилки вводимо фіктивні НП (ФНП). Дороги мають різне підпорядкування, та стан. Підпорядкованість визначає за який саме бюджет ця дорога буде ремонтуватись.

Стан дороги визначає необхідний кошторис на ремонт відповідної дороги. Існує таких п'ять станів:

- 1) видимі незначні дефекти і, необхідність ремонту до 5 %;
- 2) шелушіння, окремі нерівності покриття, частково присутні тріщини та невеликі вибоїни, необхідність ремонту до 25 %;
- 3) викрішування, раковини, зсуви, просідання, незначно виражена колійність, руйнування кромок дорожнього покриття, граней бетонного покриття, бордюрів, необхідність ремонту до 50 %;
- 4) вибоїни, проломи, великі ями, значна колійність, місцями пересування значно ускладнено, необхідність ремонту до 75 %;
- 5) базовий тип покриття практично відсутній, явно виражена колійність, пересування значно ускладнено, необхідність ремонту до 100 %.

Розрізняють 6 різних типів покриття: асфальтобетонне, цементно-бетонне, залізобетонне, бруківка, гравійне, ґрунтове.

Підпорядкованість визначає за який саме бюджет ця дорога буде ремонтуватись. Як правило, існують три бюджети:  $B_1$  — загальнодержавний бюджет,  $B_2$  — обласний бюджет,  $B_3$  — бюджет ТГ.

Нехай за бюджетом  $B_j$  було виділено  $W_j$  коштів.

При розрахунку вартості ремонту доріг визначалась ціна ремонту ста метрів дороги. Врахувався стан дороги, який множиться на певний коефіцієнт. Розроблений калькулятор знаходиться за

адресою: <http://www.roadcost.96.lt/>. Розроблений модуль дає змогу фільтрувати вартість ремонту доріг в межах ТГ за такими параметрами: тип дороги, тип покриття, стан дороги.

На рис. 1 зображено приклад обчислення вартості доріг.

Дорогу між двома різними населеними пунктами (НП) будемо розглядати як окрему дорогу. Якщо є розвилки доріг поза межами НП, то в місці такої розвилки вводимо фіктивні НП (ФНП).

Отримуємо зважений граф,  $G=(НП, E)$  вершинами якого є НП та ФНП, а ребра  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  задають кошторис  $w(e_i)$ , необхідний на ремонт дороги між відповідними НП [5-6]. Тобто, маємо  $N$  НП, які об'єднані дорогами. Очевидно, що для цього достатньо відремонтувати  $N-1$  доріг між НП.

Виникає задача: для того щоб сумарна вартість ремонту доріг була мінімальна й вартість ремонту доріг не перевищувала відповідний бюджет, як можна об'єднати НП між собою в межах ТГ,

Тобто всі ребра поділимо на 3 підмножини в залежності від виду бюджету  $E = E_1 \cup E_2 \cup E_3$ ,  $E_j = \{e_1^j, e_2^j, \dots, e_{n_j}^j\}$ ,  $j = 1, 2, 3$ .

Задача полягає в знаходженні такого зв'язаного ациклічного підграфу  $T \subset G$ , який містить всі вершини, щоб сумарна вага всіх його ребер була мінімальною при умові, що сумарна вага ребер, які належать до одного бюджету не перевищувала розмір цього бюджету.

Оскільки  $T$  зв'язаний й не містить циклів, він є деревом й називається остовним деревом (spanning tree) [7-9]. Остовне дерево  $T$ , в якого сумарна вага його ребер  $w(T) = \sum_{e_i \in T} w(e_i)$  мінімальна, називається

Номер	Тип покриття	Вартість (грн)
1	Цементнобетонне	6955
2	Залізобетонне	45
3	Бруківка	30
4	Асфальтобетонне	115
5	Гравійне	15
6	Ґрунтове	581

Номер	Стан дороги	Коеф.
1	Видимі незначні дефекти, необхідність ремонту до 5 %	2.11
2	Шелушіння, окремі нерівності покриття, частково присутні тріщини	2.6
3	Викрішування, раковини, зсуви, просідання, незначно виражена колі...	4.11
4	Вибоїни, проломи, великі ями, значна колійність, місцями пересува...	4.11
5	Базовий тип покриття практично відсутній, явно виражена колійнос...	5.11

Дорога	Відстань (м)	Тип дороги	Тип покриття	Стан	Пріоритет	Вартість (грн)
Берина - Вибранівка	3700	Територіальна районного значення	Асфальтобетонне	5	2	21743.05
Вибранівка - Загірці	2700	Територіальна районного значення	Асфальтобетонне	5	2	15866.55
Бринці-Червоки - Чиялці	1300	Територіальна районного значення	Гравійне	4	2	801.45
Чиялці - Борусів	1500	Територіальна районного значення	Гравійне	4	2	924.75
Борусів - Бориничі	1300	Територіальна районного значення	Гравійне	4	2	801.45
Вибранівка - Бринці-Червоки	1200	Територіальна районного значення	Гравійне	5	2	919.8
Хол - Юшківці	4000	Територіальна районного значення	Гравійне	4	3	2466
Девятишів - Юшківці	2000	Територіальна районного значення	Асфальтобетонне	5	2	11753

Рис. 1. Приклад обчислення вартості доріг

мінімальним остовним деревом (minimum spanning tree). Частина дерева  $T$ , що містить ребра з підмножини  $E_j$  позначатимемо  $T_j$ ,  $T = T_1 \cup T_2 \cup T_3$ . Тим самим отримаємо таку математичну модель задачі: знайти  $T \subset G$ , щоб

$$w(T) = \sum_{e_i \in T} w(e_i) \rightarrow \min \quad (1)$$

$$w(T_j) = \sum_{e_s^j \in T_j} w(e_s^j) \leq W_j, j=1,2,3 \quad (2)$$

#### 4. Модифікація алгоритму Пріма

Алгоритми Пріма або Крускала використовуються для того, щоб знайти мінімальне кістякове дерево [6-7]. Алгоритм Пріма — алгоритм побудови мінімального кістякового дерева зваженого зв'язного неорієнтованого графа. Це жадібний алгоритм.

Побудова починається з дерева, що включає в себе одну (довільну) вершину. Протягом роботи алгоритму дерево розростається, поки не охопить всі вершини вихідного графа. На кожному кроці алгоритму до поточного дереву приєднується найлегше з ребер, що з'єднують вершину з побудованого дерева і вершину, що не належить дереву

Для розв'язування задачі (1)-(2) модифіковано алгоритм Пріма. Модифікація полягає в ітераційному використанні алгоритму Пріма, поки не буде виконана умова (2).

Якщо умова (2) не виконується, то із початкового графа  $G$  вилучаємо ребро із максимальною вагою серед підмножини ребер для яких не виконується (2) із максимальною різницею між наявним бюджетом та необхідним коштом на ремонт доріг. Ребро вилучаємо із умовою, що граф  $G$  залишається зв'язним, тобто не має ізольованих вершин. Якщо такого ребра немає, то задача (1)-(2) немає розв'язку.

Отримаємо такий алгоритм визначення доріг, які необхідно відремонтувати в межах ТГ:

1) Утворити граф  $G$ , вершинами якого є НП ТГ, а ребра задають вартість ремонту доріг між НП ТГ. Відомі кошти, які закладені у бюджетах на ремонт доріг,  $W_1, W_2, W_3$ .

2) Запустити алгоритм Пріма для графу  $G$ :

2.1. Утворимо дерево  $T_1$  з одним ребром:

- виберемо його вершиною НП<sub>0</sub> центр ТГ;
- виберемо ребро  $e_1$  з найменшою вагою серед тих, що мають вершину НП<sub>0</sub>;
- покладемо  $k = 1$ .

2.2. Якщо існують вершини початкового графа  $G$  зовні останнього побудованого дерева  $T_k$  з ребрами  $e_1, e_2, \dots, e_k$ , то робимо таке:

- вибираємо ребро  $e_{k+1}$  з найменшою вагою серед тих, у яких одна вершина належить до  $T_k$ , а інша вершина не належить;

– утворюємо дерево  $T_{k+1}$  долученням до  $T_k$  вибраного ребра  $e_{k+1}$  і його вершин;

– збільшуємо величину  $k$  на 1;

2.3. Якщо всі вершини початкового графа  $G$  належать до дерева  $T_k$ , то припиняємо побудову мінімального остовного дерева, інакше переходимо на пункт 2.2

3) Для дерева  $T_k$  знаходимо вартості ремонту доріг за 3-ма підмножинами:  $w(T_j) = \sum_{e_s^j \in T_j} w(e_s^j)$ ,  $j=1,2,3$ .

4) Обчислюємо значення  $\Delta_j = W_j - w(T_j)$ ,  $j=1,2,3$ .

5. Якщо всі  $\Delta_j \geq 0$ , то дерево (план ремонту доріг) знайдено, інакше серед множини  $E_1$ , де  $l = \arg \max_{\Delta_j < 0} |\Delta_j|$ , вилучаємо ребро з максимальною вагою серед підмножини ребер  $E_1$ , після вилучення яких граф  $G$  залишається зв'язним й переходимо до п.2. Якщо ребер, після вилучення яких граф  $G$  залишається зв'язним, немає, то плану ремонту доріг для таких початкових значень не існує. Необхідно збільшувати бюджети для яких  $\Delta_j < 0$ .

Тобто в алгоритм Пріма додано ще один ітераційний процес, мета якого зменшення розмірності початкового графу за рахунок відкидання ребер, які не будуть відображені у кінцевому дереві. Дуже важливо перевіряти, щоб у графа при такому відкиданні не з'являлись ізольовані вершини, бо інакше в населений пункт, який задає така вершина, добратись буде неможливо. Складність запропонованого алгоритму в  $n$  разів більша за алгоритм Пріма, оскільки додається ще один цикл, тобто становитиме  $O(n^2 \cdot \ln n)$ .

#### 5. Приклад моделювання плану ремонту доріг у Львівській області

Практична реалізація процесу об'єднання територіальних громад розпочалась в середині 2015 року. У липні 2016 року Кабінет міністрів України затвердив перспективний план формування громад у Львівській області. Згідно з ним у регіоні затвердили 84 об'єднані територіальні громади. Це громади, які діють із 2016 та перспективні ОТГ.

17 серпня 2016 року у Львівській обласній державній адміністрації було підписано розпорядження про створення Давидівської територіальної громади. Вона складається з таких населених пунктів: Пасіки-Зубрицькі, Кротошин, Черепин, Давидів, Гончари, Виннички, Дмитровичі, Соснівка, Чишки, Волиця, Бережани, Горішній. Граф доріг територіальної громади наведено на рис. 2.

Чорними точками позначено НП, білими — ФНП (перехрестя доріг поза НП).

Дороги належать до 3 підмножин:  $E_1$  — загальнодержавного підпорядкування (червоний колір, ремонт здійснено ще у 2011 році перед ЧЄ

з футболу),  $E_2$  — обласного підпорядкування (синій колір)  $E_3$  — районного підпорядкування (чорний колір).

На графі задана вартість доріг (дані — експериментальні). Взявши, що  $W_1=30$ ,  $W_2=30$ ,  $W_3=22$ , отримаємо пропонований план ремонту доріг, який наведений на рис. 3. Якщо б не враховувалось те, що підмножини ребер різні, то за алгоритмом Пріма у Виннички пропонувалось б доїзжати із Гончарів. Однак через обмеження на бюджет, рекомендується ремонтувати дорогу із множини  $E_2$  і у Виннички їздити із перехрестя дороги, що йде на Дмитровичі.

Загалом за множинами виходить така вартість ремонту доріг:

$$w(T_1) = 0, w(T_2) = 28 < 30, w(T_3) = 21 < 22.$$

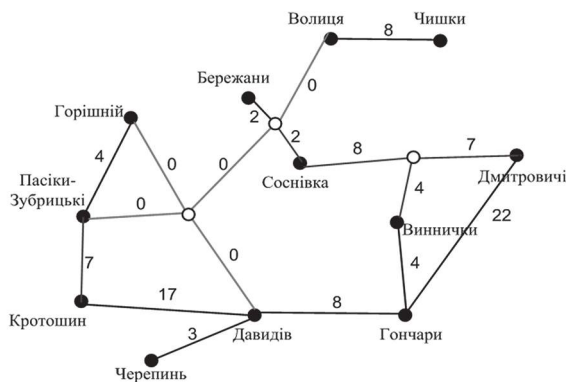


Рис. 2. Граф доріг Давидівської територіальної громади

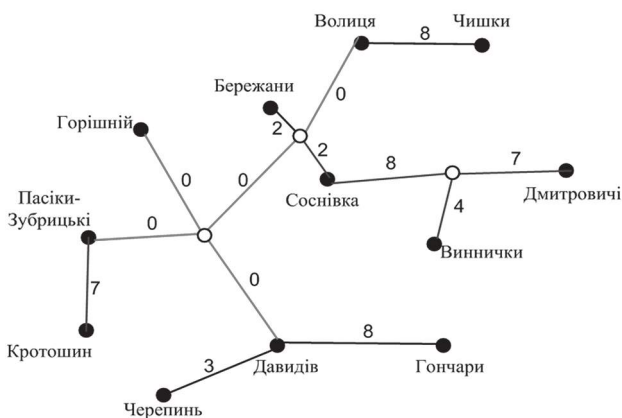


Рис. 3. Пропонований план ремонту доріг Давидівської територіальної громади

### Висновки

У даній роботі розглянуто моделювання ремонту доріг територіальної громади при наявності коштів та в залежності від стану та покриття доріг, їх підпорядкованості та бюджету. Запропоновано використати модифікацію алгоритму Пріма.

На сьогодні ця задача стає актуальною, оскільки процес формування громад та їхній розвиток є важливим завданням. В межах територіальної громади знаходяться важливі адміністративні будівлі, лікарня, школи, тощо. Тому доїзд до цих закладів в межах громади є суттєвою проблемою, зважаючи на стан доріг, адже значна частина доріг є в незадовільному стані. Запропоновано розв'язувати класичну задачу пошуку мінімального остовного дерева з врахуванням специфіки підпорядкування доріг, стану та покриття доріг, бюджету.

Наведено приклад використання запропонованого підходу в межах Давидівської територіальної громади. У подальших дослідженнях планується враховувати ще один показник, який суттєво впливає на визначення доріг, які підлягають якнайшвидшому ремонту, а саме — пріоритет дороги (1 — дорога має стратегічно важливе значення, з трафіком понад 500 автотранспортних засобів за добу; 2 — дорога має важливе значення, з трафіком руху від 100 до 500 автотранспортних засобів за добу; 3 — дорога має другорядне значення, з трафіком руху менше 100 автотранспортних засобів за добу). Тим самим дослідження полягатимуть в побудові інтегральної функції оцінки ребра початкового зваженого графу  $G$ , який зв'язує певні два населені пункти, де буде враховуватися не лише вартість ремонту дороги, але й її пріоритет.

### Список літератури:

1. Закон України (2015). Про добровільне об'єднання територіальних громад. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/157-19>.
2. Постанова Кабінету Міністрів України Про затвердження Методики формування спроможних територіальних громад. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/214-2015-п>.
3. Стан українських доріг [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [http://censor.net.ua/news/430063/95\\_ukrainskih\\_dorog\\_ostayutsya\\_v\\_nepriygodnom\\_sostoyanii\\_omelyan](http://censor.net.ua/news/430063/95_ukrainskih_dorog_ostayutsya_v_nepriygodnom_sostoyanii_omelyan).
4. Ремонти доріг [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [http://censor.net.ua/news/430172/ukravtodoru\\_nado\\_organizatsionno\\_pravilno\\_rabotat\\_95\\_dorog\\_nahodyatsya\\_v\\_ujasnom\\_sostoyanii\\_groyisman](http://censor.net.ua/news/430172/ukravtodoru_nado_organizatsionno_pravilno_rabotat_95_dorog_nahodyatsya_v_ujasnom_sostoyanii_groyisman).
5. В.В. Литвин, Д.І. Угрин, А.М. Фітьо, «Моделювання процесу формування територіальних громад як задачі розбиття графу», Східно-Європейський журнал передових технологій, №1/4(79), С.47-52, 2016.
6. В.В.Литвин, Д.І.Угрин, А.М.Фітьо «Формалізація задачі формування територіальних громад», 11 Міжнародна науково-практична конференція „Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС” (27 червня — 1 липня 2016). — Жукин. — С. 290-292.
7. Макконелл Дж., «Основи сучасних алгоритмів: 2-е доповнене видання», М.: Техносфера, 2014, 368 с.
8. М. Свами, К. Тхуласираман «Графи, сети и алгоритмы», М.: Наука, 2014, 256 с.

Надійшла до редколегії 11.04.2018

УДК 517.988 : 519.632



М.В. Сидоров

Харківський національний університет радіоелектроніки,  
м. Харків, Україна, maxim.sidorov@nure.ua

## МЕТОД ДВОБІЧНИХ ІТЕРАЦІЙ У ЧИСЕЛЬНОМУ АНАЛІЗІ ПЕРШОЇ КРАЙОВОЇ ЗАДАЧІ ДЛЯ СИСТЕМИ НАПІВЛІНІЙНИХ ЕЛІПТИЧНИХ РІВНЯНЬ

Розглядається проблема побудови метода двобічних ітерацій розв'язання першої крайової задачі для системи напівлінійних еліптичних рівнянь. Запропоновано два підходи, засновані на використанні відповідно методу функцій Гріна і методу квазіфункцій Гріна-Рвачова. За допомогою цих методів розглядувана крайова задача зводиться до еквівалентного нелінійного інтегрального рівняння. Отримане інтегральне рівняння досліджується методами нелінійного аналізу у напівупорядкованих просторах, зокрема, з використанням результатів В.І. Опоїцева з теорії гетеротонних операторів. При цьому будується ітераційна послідовність, яка двобічно збігається до єдиного додатного розв'язку відповідної крайової задачі.

СИСТЕМА НАПІВЛІНІЙНИХ ЕЛІПТИЧНИХ РІВНЯНЬ, ПЕРША КРАЙОВА ЗАДАЧА, ДОДАТНИЙ РОЗВ'ЯЗОК, МЕТОД ФУНКЦІЙ ГРИНА, МЕТОД КВАЗІФУНКЦІЙ ГРИНА-РВАЧОВА, МЕТОД ДВОБІЧНИХ ІТЕРАЦІЙ

**Сидоров М.В. Метод двусторонних итераций в численном анализе первой краевой задачи для системы полулинейных эллиптических уравнений.** Рассматривается проблема построения метода двусторонних итераций решения первой краевой задачи для системы полулинейных эллиптических уравнений. Предложено два подхода, основанные на использовании соответственно метода функций Грина и метода квазифункций Грина-Рвачева. С помощью этих методов рассматриваемая краевая задача сводится к эквивалентному нелинейному интегральному уравнению. Полученное интегральное уравнение исследуется методами нелинейного анализа в полупорядоченных пространствах, в частности, с использованием результатов В.И. Опойцева из теории гетеротонных операторов. При этом строится итерационная последовательность, которая двусторонне сходится к единственному положительному решению соответствующей краевой задачи.

СИСТЕМА ПОЛУЛИНЕЙНЫХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ, ПЕРВАЯ КРАЕВАЯ ЗАДАЧА, ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ, МЕТОД ФУНКЦИЙ ГРИНА, МЕТОД КВАЗІФУНКЦИЙ ГРИНА-РВАЧЕВА, МЕТОД ДВУСТОРОННИХ ИТЕРАЦИЙ

**Sidorov M.V. The method of two-sided iterations in the numerical analysis of the first boundary value problem for a system of semilinear elliptic equations.** The problem of constructing a two-sided iteration method for solving the first boundary value problem for a system of semilinear elliptic equations is considered. Two approaches are proposed, based on the use of the Green functions method and the Green-Rvachev quasi-functions method, respectively. With the help of these methods, the considered boundary value problem is reduced to an equivalent nonlinear integral equation. The obtained integral equation is investigated by methods of nonlinear analysis in semi-ordered spaces, in particular, using the results of V.I. Opoicev from the theory of heterotone operators. In this case, an iterative sequence is constructed, which two-sided converges to the only positive solution of the corresponding boundary value problem.

SYSTEM OF SEMILINEAR ELLIPTIC EQUATIONS, FIRST BOUNDARY VALUE PROBLEM, POSITIVE SOLUTION, GREEN FUNCTIONS METHOD, GREEN-RVACHEV QUASI-FUNCTIONS METHOD, TWO-SIDED ITERATIONS METHOD

### Вступ

Математичне моделювання різноманітних процесів у хімії, фізиці плазми, теорії горіння, біології тощо [1] призводить до необхідності розв'язання першої крайової задачі для системи напівлінійних еліптичних рівнянь. Зазвичай для таких задач не має можливості отримати точний розв'язок аналітичними методами, і вони піддаються лише дослідженню чисельними методами. Також такі задачі потребують дослідження проблеми існування та єдиності розв'язку [2–6]. У зв'язку з цим актуальною науковою проблемою є розробка нових та вдосконалення існуючих методів конструктивного дослідження нелінійних крайових задач для систем напівлінійних рівнянь, які б не тільки дозволяли з'ясувати питання

існування розв'язку, але й пропонували чисельний алгоритм його знаходження. Серед таких методів особливе місце належить методам двобічних ітерацій, які дозволяють апроксимувати невідомий розв'язок знизу та зверху двома послідовностями, а отже, надають можливість отримати для похибки наближеного розв'язку зручну апостеріорну оцінку [7–9].

Метою роботи є розробка нових методів двобічних ітерацій розв'язання першої крайової задачі для системи напівлінійних еліптичних рівнянь.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

– замінити першу крайову задачу для системи напівлінійних еліптичних рівнянь операторним рівнянням з гетеротонним оператором;

– з використанням теорії нелінійних операторів у напівупорядкованих просторах, зокрема, результатів В.І. Опойцева про розв’язність операторних рівнянь з гетеротонним оператором [7], розробити метод двобічних ітерацій розв’язання отриманого нелінійного інтегрального рівняння.

Дана робота продовжує дослідження, розпочаті у [10, 11] і узагальнює їх на випадок напівлінійних еліптичних систем більш загального вигляду.

### 1. Постановка задачі

Розглядатимемо проблему знаходження додатного розв’язку першої крайової задачі для системи  $n$  напівлінійних еліптичних рівнянь:

$$-\operatorname{div}(p_i(\mathbf{x})\nabla u_i) + q_i(\mathbf{x})u_i = f_i(\mathbf{x}, u_1, \dots, u_n), \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad (1)$$

$$u_i(\mathbf{x}) > 0, \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad (2)$$

$$u_i|_{\partial\Omega} = 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

де  $\Omega$  – обмежена вимірна за Жорданом область з  $\mathbb{R}^2$  чи  $\mathbb{R}^3$  з кусково-гладкою межею  $\partial\Omega$  ( $\bar{\Omega} = \Omega \cup \partial\Omega$ );  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ , якщо  $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ , і  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ , якщо  $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ .

Вважатимемо, що для всіх  $i = 1, 2, \dots, n$

$$p_i(\mathbf{x}) > 0 \text{ у } \bar{\Omega}, \quad q_i(\mathbf{x}) \geq 0 \text{ у } \bar{\Omega}, \quad (4)$$

$p_i(\mathbf{x})$  неперервно диференційовані у  $\bar{\Omega}$ ,

$q_i(\mathbf{x})$  неперервні у  $\bar{\Omega}$ ,

$f_i(\mathbf{x}, u_1, \dots, u_n)$  неперервні і додатні

при  $\mathbf{x} \in \bar{\Omega}$ ,  $u_1, \dots, u_n > 0$ . (5)

У векторній формі задача (1) – (3) запишеться у вигляді

$$-\operatorname{div}(\mathbf{p}(\mathbf{x})\nabla \mathbf{u}) + \mathbf{q}(\mathbf{x})\mathbf{u} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad \mathbf{x} \in \Omega,$$

$$\mathbf{u} > \boldsymbol{\theta}, \quad \mathbf{x} \in \Omega,$$

$$\mathbf{u}|_{\partial\Omega} = \boldsymbol{\theta}.$$

Тут  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)$ ,  $\mathbf{p}(\mathbf{x}) = (p_1(\mathbf{x}), \dots, p_n(\mathbf{x}))$ ,  $\mathbf{q}(\mathbf{x}) = (q_1(\mathbf{x}), \dots, q_n(\mathbf{x}))$ ,  $\mathbf{f} = (f_1, \dots, f_n)$ ,  $\boldsymbol{\theta} = (0, \dots, 0)$ .

Нерівність  $\mathbf{u} > \boldsymbol{\theta}$  та подібні до них нерівності розумітимемо у тому сенсі, що  $u_i > 0$  для всіх  $i = 1, \dots, n$ .

### 2. Побудова методу двобічних ітерацій на основі використання функції Гріна

Від задачі (1) – (3) перейдемо до еквівалентної системи з  $n$  інтегральних рівнянь Гаммерштейна вигляду

$$u_i(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) f_i(\mathbf{s}, u_1(\mathbf{s}), \dots, u_n(\mathbf{s})) ds, \quad i = 1, \dots, n, \quad (6)$$

де  $G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s})$ ,  $i = 1, \dots, n$ , – функція Гріна першої крайової задачі для оператора  $A_i u \equiv -\operatorname{div}(p_i(\mathbf{x})\nabla u) + q_i(\mathbf{x})u$  у області  $\Omega$ ;  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ ,  $\mathbf{s} = (s_1, s_2)$ , якщо  $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ , і  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ ,  $\mathbf{s} = (s_1, s_2, s_3)$ , якщо  $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ .

Функцією Гріна задачі (1) – (3) вважатимемо вектор-функцію  $\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = (G_1(\mathbf{x}, \mathbf{s}), \dots, G_n(\mathbf{x}, \mathbf{s}))$ , яка

складається з функцій Гріна перших крайових задач для операторів  $A_i u$ ,  $i = 1, \dots, n$ , у області  $\Omega$ .

У векторній формі запису система (6) запишеться у вигляді

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \mathbf{f}(\mathbf{s}, \mathbf{u}(\mathbf{s})) ds,$$

де

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \mathbf{f}(\mathbf{s}, \mathbf{u}(\mathbf{s})) =$$

$$= (G_1(\mathbf{x}, \mathbf{s}) f_1(\mathbf{s}, \mathbf{u}(\mathbf{s})), \dots, G_n(\mathbf{x}, \mathbf{s}) f_n(\mathbf{s}, \mathbf{u}(\mathbf{s}))).$$

Систему рівнянь (6) розглядатимемо у банаховому просторі

$$C_n(\bar{\Omega}) = \{\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n) : u_i \in C(\bar{\Omega}), i = 1, \dots, n\}$$

вектор-функцій, неперервних у  $\bar{\Omega}$ , з нормою

$\|\mathbf{u}\|_n = \max\{\|u_1\|, \dots, \|u_n\|\}$ , де  $\|u_i\| = \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} |u_i(\mathbf{x})|$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

Виділимо у  $C^n(\bar{\Omega})$  конус

$$\mathcal{K}_+ = \{\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n) \in C^n(\bar{\Omega}) : u_i(\mathbf{x}) \geq 0, \mathbf{x} \in \bar{\Omega}, i = 1, \dots, n\}$$

вектор-функцій з невід’ємними координатами. Конус  $\mathcal{K}_+$  у  $C^n(\bar{\Omega})$  є нормальним (і навіть гострим).

За допомогою конуса  $\mathcal{K}_+$  у просторі  $C^n(\bar{\Omega})$  введемо напівупорядкованість за правилом:

$$\text{для } \mathbf{u}, \mathbf{v} \in C^n(\bar{\Omega}) \quad \mathbf{u} \leq \mathbf{v}, \text{ якщо } \mathbf{v} - \mathbf{u} \in \mathcal{K}_+,$$

тобто

$$\mathbf{u} \leq \mathbf{v}, \text{ якщо } u_i(\mathbf{x}) \leq v_i(\mathbf{x})$$

для всіх  $\mathbf{x} \in \bar{\Omega}$  і всіх  $i = 1, \dots, n$ .

Якщо існує класичний розв’язок задачі (1) – (3), тобто така вектор-функція  $\mathbf{u}^* \in C_n^2(\Omega) \cap C_n(\bar{\Omega})$ , яка задовольняє систему рівнянь (1) і умови (2), (3), то ця ж функція також задовольняє і систему рівнянь (6). Якщо ж класичний розв’язок не існує, то систему інтегральних рівнянь (6) можна взяти за основу означення узагальненого розв’язку задачі (1) – (3).

**Означення 1.** Розв’язком (узагальненим) задачі (1) – (3) називатимемо вектор-функцію  $\mathbf{u}^* \in \mathcal{K}_+$ , яка є розв’язком системи інтегральних рівнянь (6).

Введемо у розгляд нелінійний інтегральний оператор  $\mathbf{T}$ , який діє у  $C_n(\bar{\Omega})$  за правилом, що визначається правою частиною системи рівнянь (6):

$$\begin{aligned} \mathbf{T}(\mathbf{u})(\mathbf{x}) &= \int_{\Omega} \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \mathbf{f}(\mathbf{s}, \mathbf{u}(\mathbf{s})) ds = \\ &= \left( \int_{\Omega} G_1(\mathbf{x}, \mathbf{s}) f_1(\mathbf{s}, u_1(\mathbf{s}), \dots, u_n(\mathbf{s})) ds, \dots, \right. \\ &\quad \left. \int_{\Omega} G_n(\mathbf{x}, \mathbf{s}) f_n(\mathbf{s}, u_1(\mathbf{s}), \dots, u_n(\mathbf{s})) ds \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Розглянемо властивості має оператор  $\mathbf{T}$  вигляду (7). Позначимо через  $T_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , частковий оператор

$$T_i(\mathbf{u})(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) f_i(\mathbf{s}, u_1(\mathbf{s}), \dots, u_n(\mathbf{s})) ds. \quad (8)$$

Кожна з функцій Гріна  $G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s})$ ,  $i = 1, \dots, n$ , неперервна при  $\mathbf{x}, \mathbf{s} \in \bar{\Omega}$ ,  $\mathbf{x} \neq \mathbf{s}$ , і справджуються оцінки

$$0 \leq G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \leq k_0 \left| \ln \frac{1}{r_{\mathbf{x}\mathbf{s}}} \right| \text{ у } \mathbb{R}^2, \quad 0 \leq G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \leq \frac{k_0}{r_{\mathbf{x}\mathbf{s}}} \text{ у } \mathbb{R}^3,$$

де  $r_{\mathbf{x}\mathbf{s}} = |\mathbf{x} - \mathbf{s}|$  – відстань між точками  $\mathbf{x}$  і  $\mathbf{s}$ .

Тоді, з урахуванням умови (5), можна зробити такий висновок: кожен з операторів  $T_i$  вигляду (8) діє з  $C_n(\bar{\Omega})$  в  $C(\bar{\Omega})$  і, якщо  $\mathbf{u} \in \mathcal{K}_+$ , то  $T_i(\mathbf{u})(\mathbf{x}) \geq 0$  для всіх  $\mathbf{x} \in \bar{\Omega}$ ,  $i = 1, \dots, n$ , а отже, оператор  $\mathbf{T}$  діє у  $C_n(\bar{\Omega})$  і  $\mathbf{T}(\mathbf{u}) \in \mathcal{K}_+$ , тобто оператор  $\mathbf{T}$  є додатним, бо залишає інваріантним конус  $\mathcal{K}_+$ .

Введемо до розгляду вектор-функцію  $\mathbf{u}_0(\mathbf{x})$  за формулою

$$\mathbf{u}_0(\mathbf{x}) = (u_0^1(\mathbf{x}), \dots, u_0^n(\mathbf{x})) = \left( \int_{\Omega} G_1(\mathbf{x}, \mathbf{s}) ds, \dots, \int_{\Omega} G_n(\mathbf{x}, \mathbf{s}) ds \right). \quad (9)$$

Для всіх  $\mathbf{x} \in \bar{\Omega}$  значення кожного з операторів (8) оцінюється нерівністю

$$\alpha_i u_0^i(\mathbf{x}) \leq T_i(\mathbf{u})(\mathbf{x}) \leq \beta_i u_0^i(\mathbf{x}), \quad (10)$$

де  $\alpha_i = \alpha_0^i \gamma_i > 0$ ,  $\beta_i = \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} f_i(\mathbf{x}, u_1(\mathbf{x}), \dots, u_n(\mathbf{x})) > 0$ .

Тут  $\alpha_0^i > 0$  таке, що існує множина  $\Omega_0^i \subset \Omega$  така, що  $\mu(\Omega_0^i) > 0$  і  $f_i(\mathbf{x}, u_1(\mathbf{x}), \dots, u_n(\mathbf{x})) \geq \alpha_0^i$  для всіх  $\mathbf{x} \in \Omega_0^i$ , а  $\gamma_i > 0$  таке, що

$$\gamma_i \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) ds \leq \int_{\Omega_0^i} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) ds.$$

Тоді для всіх  $\mathbf{x} \in \bar{\Omega}$  матиме місце подвійна нерівність

$$\alpha \mathbf{u}_0(\mathbf{x}) \leq \int_{\Omega} \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \mathbf{f}(\mathbf{s}, \mathbf{u}(\mathbf{s})) ds \leq \beta \mathbf{u}_0(\mathbf{x}), \quad (11)$$

де  $\alpha = \min\{\alpha_1, \dots, \alpha_n\} > 0$ ,  $\beta = \max\{\beta_1, \dots, \beta_n\} > 0$ , яка означає, що оператор  $\mathbf{T}$  є  $\mathbf{u}_0$ -додатним.

Припустимо, що вектор-функція  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  дозволяє діагональне подання

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{u}) = (\hat{f}_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{u}), \dots, \hat{f}_n(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{u})),$$

де неперервні за сукупністю змінних  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{w}$  функції  $\hat{f}_i(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{w}) = \hat{f}_i(\mathbf{x}, v_1, \dots, v_n, w_1, \dots, w_n)$  монотонно зростають за всіма  $v_i$  і монотонно спадають за всіма  $w_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , для всіх  $\mathbf{x} \in \Omega$ . Тоді оператор  $\mathbf{T}$  вигляду (7) буде гетеротонним з супровідним оператором

$$\hat{\mathbf{T}}(\mathbf{v}, \mathbf{w})(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} G(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{s}, \mathbf{v}(\mathbf{s}), \mathbf{w}(\mathbf{s})) ds = \left( \int_{\Omega} G_1(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_1(\mathbf{s}, v_1(\mathbf{s}), \dots, v_n(\mathbf{s}), w_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s})) ds, \dots, \int_{\Omega} G_n(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_n(\mathbf{s}, v_1(\mathbf{s}), \dots, v_n(\mathbf{s}), w_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s})) ds \right). \quad (12)$$

Оператори  $\mathbf{T}$  і  $\hat{\mathbf{T}}$  є цілком неперервними.

Позначимо також через  $\hat{T}_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , оператори

$$\hat{T}_i(\mathbf{v}, \mathbf{w})(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, v_1(\mathbf{s}), \dots, v_n(\mathbf{s}), w_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s})) ds = \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, \mathbf{v}(\mathbf{s}), \mathbf{w}(\mathbf{s})) ds. \quad (13)$$

Оператор  $T_i$  вигляду (8) буде гетеротонним з супровідним оператором  $\hat{T}_i$  вигляду (13).

Нехай для всіх додатних чисел  $v_1, \dots, v_n, w_1, \dots, w_n$  і будь-якого  $\tau \in (0, 1)$  виконуються нерівності

$$\hat{f}_i\left(\mathbf{x}, \tau \mathbf{v}, \frac{1}{\tau} \mathbf{w}\right) > \tau \hat{f}_i(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{w}), \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad i = 1, \dots, n. \quad (14)$$

Доведемо, що за виконання умов (14) гетеротонний оператор  $\mathbf{T}$  вигляду (7), для якого оператор  $\hat{\mathbf{T}}$  вигляду (12) є супровідним, буде псевдоувігнутих і навіть буде  $\mathbf{u}_0$ -псевдоувігнутих з  $\mathbf{u}_0(\mathbf{x})$  вигляду (9).

Позначимо через  $\mathbf{K}(\mathbf{u}_0)$  множину вектор-функцій  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)$  таких, для яких існують числа  $\alpha, \beta > 0$  такі, що  $\alpha \mathbf{u}_0 \leq \mathbf{u} \leq \beta \mathbf{u}_0$ , тобто  $\mathbf{K}(\mathbf{u}_0)$  складається з тих вектор-функцій  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)$ , в яких  $u_i \in K(u_0^i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

Для будь-яких  $\mathbf{v}, \mathbf{w} \in \mathcal{K}_+ \setminus \{\theta\}$ ,  $\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_n)$ ,  $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_n)$ , з нерівності (11) випливає, що

$$\alpha \mathbf{u}_0(\mathbf{x}) \leq \int_{\Omega} \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{s}, \mathbf{v}(\mathbf{s}), \mathbf{w}(\mathbf{s})) ds \leq \beta \mathbf{u}_0(\mathbf{x}),$$

де  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$ , тобто  $\hat{\mathbf{T}}(\mathbf{v}, \mathbf{w}) \in \mathbf{K}(\mathbf{u}_0)$  для будь-яких  $\mathbf{v}, \mathbf{w} \in \mathcal{K}_+ \setminus \{\theta\}$ .

За виконання умов (14) для будь-яких  $\mathbf{v}, \mathbf{w} \in \mathbf{K}(\mathbf{u}_0)$  і для всіх  $\mathbf{x} \in \bar{\Omega}$  має місце нерівність

$$\hat{T}_i\left(\tau \mathbf{v}, \frac{1}{\tau} \mathbf{w}\right)(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i\left(\mathbf{s}, \tau v(\mathbf{s}), \frac{1}{\tau} w(\mathbf{s})\right) ds > \tau \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, \mathbf{v}(\mathbf{s}), \mathbf{w}(\mathbf{s})) ds = \tau \hat{T}_i(\mathbf{v}, \mathbf{w})(\mathbf{x}), \quad i = 1, \dots, n,$$

а отже, для будь-яких  $\mathbf{v}, \mathbf{w} \in \mathbf{K}(\mathbf{u}_0)$  і для всіх  $\mathbf{x} \in \bar{\Omega}$  матиме місце і нерівність

$$\hat{\mathbf{T}}\left(\tau \mathbf{v}, \frac{1}{\tau} \mathbf{w}\right)(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{\mathbf{f}}\left(\mathbf{s}, \tau \mathbf{v}(\mathbf{s}), \frac{1}{\tau} \mathbf{w}(\mathbf{s})\right) ds > \tau \int_{\Omega} \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{s}, \mathbf{v}(\mathbf{s}), \mathbf{w}(\mathbf{s})) ds = \tau \hat{\mathbf{T}}(\mathbf{v}, \mathbf{w})(\mathbf{x}),$$

яка і означає псевдоувігнутих оператора  $\mathbf{T}$  вигляду (7), для якого оператор  $\hat{\mathbf{T}}$  вигляду (12) є супровідним.

Крім того, для всіх  $\mathbf{x} \in \bar{\Omega}$  і  $\tau \in (0, 1)$  матиме місце нерівність

$$\hat{T}_i\left(\tau \mathbf{v}, \frac{1}{\tau} \mathbf{w}\right)(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i\left(\mathbf{s}, \tau v(\mathbf{s}), \frac{1}{\tau} w(\mathbf{s})\right) ds \geq \tau(1 + \eta_i) \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, \mathbf{v}(\mathbf{s}), \mathbf{w}(\mathbf{s})) ds = \tau(1 + \eta_i) \hat{T}_i(\mathbf{v}, \mathbf{w})(\mathbf{x}), \quad i = 1, \dots, n,$$

де  $\eta_i = \eta_i(\mathbf{v}, \mathbf{w}, \tau) > 0$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

Тоді для всіх  $\mathbf{x} \in \bar{\Omega}$  і  $\tau \in (0, 1)$  матимемо

$$\mathbf{T}\left(\tau \mathbf{v}, \frac{1}{\tau} \mathbf{w}\right)(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{\mathbf{f}}\left(\mathbf{s}, \tau \mathbf{v}(\mathbf{s}), \frac{1}{\tau} \mathbf{w}(\mathbf{s})\right) ds \geq \tau(1 + \eta) \int_{\Omega} \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{s}, \mathbf{v}(\mathbf{s}), \mathbf{w}(\mathbf{s})) ds = \tau(1 + \eta) \hat{\mathbf{T}}(\mathbf{v}, \mathbf{w})(\mathbf{x}),$$

де  $\eta = \min\{\eta_1, \dots, \eta_n\} > 0$ , а отже, оператор  $\mathbf{T}$  вигляду (7) є  $\mathbf{u}_0$ -псевдо-увігнутих оператором.

Отже, має місце таке твердження.

**Лема 1.** Оператор  $\mathbf{T}$  вигляду (7), де  $\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{s})$  – функція Гріна задачі (1) – (3), розглядуваний у просторі  $C_n(\bar{\Omega})$ , напівупорядкованому конусом  $\mathcal{K}_+$  невід’ємних функцій, має такі властивості:

- а) є додатним оператором;
- б) є  $\mathbf{u}_0$ -додатним оператором, де вектор-функція  $\mathbf{u}_0(\mathbf{x})$  визначається рівністю (9);

в) є гетеротонним оператором, для якого оператор  $\hat{T}$  вигляду (12) є супровідним, якщо вектор-функція  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  дозволяє діагональне подання, тобто  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{u}) = (f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{u}), \dots, f_n(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{u}))$ , де неперервні за сукупністю змінних  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{w}$  функції  $f_i(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{w}) = f_i(\mathbf{x}, v_1, \dots, v_n, w_1, \dots, w_n)$  монотонно зростають за всіма  $v_i$  і монотонно спадають за всіма  $w_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , для всіх  $\mathbf{x} \in \Omega$ ;

г) якщо виконуються нерівності (14) є псевдодувігнутим і навіть  $\mathbf{u}_0$ -псевдодувігнутим оператором, де функція  $\mathbf{u}_0(\mathbf{x})$  має вигляд (9).

Побудуємо метод двобічних ітерацій знаходження додатного розв'язку системи інтегральних рівнянь (6) (а отже, і крайової задачі (1) – (3)), вважаючи, що оператор  $\mathbf{T}$  вигляду (7) є гетеротонним з супровідним оператором вигляду (12).

У конусі  $\mathcal{K}_+$  виділимо сильно інваріантний конусний відрізок  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$ ,  $\mathbf{v}^0 = (v_1^0, \dots, v_n^0)$ ,  $\mathbf{w}^0 = (w_1^0, \dots, w_n^0)$ , умовами:

$$\int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, v_1^0(\mathbf{s}), \dots, v_n^0(\mathbf{s}), w_1^0(\mathbf{s}), \dots, w_n^0(\mathbf{s})) ds \geq v_i^0(\mathbf{x}) \text{ для всіх } \mathbf{x} \in \bar{\Omega}, \quad (15)$$

$$\int_{\Omega} G(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, w_1^0(\mathbf{s}), \dots, w_n^0(\mathbf{s}), v_1^0(\mathbf{s}), \dots, v_n^0(\mathbf{s})) ds \leq w_i^0(\mathbf{x}) \text{ для всіх } \mathbf{x} \in \bar{\Omega}, \quad (16)$$

$i = 1, \dots, n$ .

Сформуємо ітераційний процес за схемою

$$v_i^{(k+1)}(\mathbf{x}) = \quad (17)$$

$$= \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, v_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, v_n^{(k)}(\mathbf{s}), w_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, w_n^{(k)}(\mathbf{s})) ds,$$

$$w_i^{(k+1)}(\mathbf{x}) = \quad (18)$$

$$= \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, w_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, w_n^{(k)}(\mathbf{s}), v_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, v_n^{(k)}(\mathbf{s})) ds,$$

$i = 1, \dots, n, k = 0, 1, 2, \dots;$

$$v_i^{(0)}(\mathbf{x}) = v_i^0(\mathbf{x}), w_i^{(0)}(\mathbf{x}) = w_i^0(\mathbf{x}), i = 1, \dots, n. \quad (19)$$

З сильної інваріантності конусного відрізка  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  та гетеротонності оператора  $\mathbf{T}$  вигляду (7), для якого оператор  $\hat{T}$  вигляду (12) є супровідним, впливає, що послідовність  $\{\mathbf{v}^{(k)}(\mathbf{x})\}$  не спадає за конусом  $\mathcal{K}_+$ , а послідовність  $\{\mathbf{w}^{(k)}(\mathbf{x})\}$  не зростає за конусом  $\mathcal{K}_+$ . Тоді з огляду на нормальність конуса  $\mathcal{K}_+$  і повну неперервність оператора  $\hat{T}$  можна зробити висновок про існування границь  $\mathbf{v}^*(\mathbf{x})$  і  $\mathbf{w}^*(\mathbf{x})$  цих послідовностей. Отже, справджується ланцюг нерівностей

$$\mathbf{v}^0 = \mathbf{v}^{(0)} \leq \mathbf{v}^{(1)} \leq \dots \leq \mathbf{v}^{(k)} \leq \dots \leq \mathbf{v}^* \leq \mathbf{w}^* \leq \dots \leq \mathbf{w}^{(k)} \leq \dots \leq \mathbf{w}^{(1)} \leq \mathbf{w}^0 = \mathbf{w}^0.$$

При цьому можливі два випадки:  $\mathbf{v}^* < \mathbf{w}^*$  і  $\mathbf{v}^* = \mathbf{w}^*$ . У другому випадку  $\mathbf{u}^* := \mathbf{v}^* = \mathbf{w}^*$  – єдина на конусному відрізку  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  нерухома точка оператора  $\mathbf{T}$ , а отже,  $\mathbf{u}^*$  – єдиний на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  розв'язок розглядуваної крайової задачі (1) – (3).

Вектор-функції  $\mathbf{v}^* = (v_1^*, \dots, v_n^*)$  і  $\mathbf{w}^* = (w_1^*, \dots, w_n^*)$  є розв'язком системи  $2n$  нелінійних інтегральних рівнянь

$$v_i(\mathbf{x}) =$$

$$= \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, v_1(\mathbf{s}), \dots, v_n(\mathbf{s}), w_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s})) ds, \quad (20)$$

$$w_i(\mathbf{x}) =$$

$$= \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, w_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s}), v_1(\mathbf{s}), \dots, v_n(\mathbf{s})) ds, \quad (21)$$

$$i = 1, \dots, n.$$

Рівність  $\mathbf{v}^* = \mathbf{w}^*$  буде виконана, якщо система (20), (21) не має на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  таких розв'язків, що  $\mathbf{v} \neq \mathbf{w}$ .

Отже, має місце така теорема.

**Теорема 1.** Нехай  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  – сильно інваріантний конусний відрізок для гетеротонного оператора  $\mathbf{T}$  вигляду (7) з супровідним оператором  $\hat{T}$  вигляду (12) і система рівнянь (20), (21) не має на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  розв'язків таких, що  $\mathbf{v} \neq \mathbf{w}$ . Тоді ітераційний процес (17) – (19) збігається у нормі простору  $C_n(\bar{\Omega})$  до єдиного на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  неперервного додатного розв'язку  $\mathbf{u}^*$  крайової задачі (1) – (3), причому має місце ланцюг нерівностей

$$\mathbf{v}^0 = \mathbf{v}^{(0)} \leq \mathbf{v}^{(1)} \leq \dots \leq \mathbf{v}^{(k)} \leq \dots \leq \mathbf{u}^* \leq \dots \leq \mathbf{w}^{(k)} \leq \dots \leq \mathbf{w}^{(1)} \leq \mathbf{w}^0 = \mathbf{w}^0. \quad (22)$$

Теорема 1 може бути уточнена за рахунок використання різних умов, за виконання яких система рівнянь (20), (21) не має на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  розв'язків таких, що  $\mathbf{v} \neq \mathbf{w}$ .

Нехай існує такий номер  $i_0$ ,  $1 \leq i_0 \leq n$ , що для будь-яких чисел  $v_1, \dots, v_n, w_1, \dots, w_n, u_1, \dots, u_n$ , таких, що  $0 < v_i < w_i$ ,  $0 < u_i < w_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , і для всіх  $\mathbf{x} \in \Omega$  має місце нерівність

$$\hat{f}_{i_0}(\mathbf{x}, v_1 + u_1, \dots, v_n + u_n, w_1 - u_1, \dots, w_n - u_n) < \hat{f}_{i_0}(\mathbf{x}, v_1, \dots, v_n, w_1, \dots, w_n) + u_{i_0} M_{i_0}^{-1}, \quad (23)$$

де  $M_{i_0} = \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} u_{i_0}^0(\mathbf{x})$ .

Візьмемо такі вектор-функції  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)$  і  $\mathbf{w} - \mathbf{v} = (w_1 - v_1, \dots, w_n - v_n)$  з  $\mathcal{K}_+ \setminus \{\theta\}$ , що

$$\mathbf{v}, \mathbf{w}, \mathbf{v} + \mathbf{u}, \mathbf{w} - \mathbf{u} \in \langle \mathbf{v}^{(1)}, \mathbf{w}^{(1)} \rangle. \quad (24)$$

З умов (24) витікає, що  $\mathbf{u}(\mathbf{x}) \geq \theta$  на  $\bar{\Omega}$  і  $\mathbf{u}|_{\partial\Omega} = \theta$ . Тоді, якщо функція  $u_{i_0}(\mathbf{x})$  набуває максимального значення у точці  $\mathbf{x}_0 \in \Omega$ . Отже, матимемо

$$\int_{\Omega} G_{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) \hat{f}_{i_0}(\mathbf{x}, v_1(\mathbf{s}) + u_1(\mathbf{s}), \dots, v_n(\mathbf{s}) + u_n(\mathbf{s}), w_1(\mathbf{s}) - u_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s}) - u_n(\mathbf{s})) ds < \int_{\Omega} G_{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) [\hat{f}_{i_0}(\mathbf{s}, v_1(\mathbf{s}), \dots, v_n(\mathbf{s}), w_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s})) + u_{i_0}(\mathbf{s}) M_{i_0}^{-1}] ds \leq \int_{\Omega} G_{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) \hat{f}_{i_0}(\mathbf{s}, v_1(\mathbf{s}), \dots, v_n(\mathbf{s}), w_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s})) ds + M_{i_0}^{-1} \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} u_{i_0}(\mathbf{x}) \int_{\Omega} G_{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) ds \leq \int_{\Omega} G_{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) \hat{f}_{i_0}(\mathbf{s}, v_1(\mathbf{s}), \dots, v_n(\mathbf{s}), w_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s})) ds + u_{i_0}(\mathbf{x}_0),$$



тобто

$$\hat{T}_0(\mathbf{v} + \mathbf{u}, \mathbf{w} - \mathbf{u})(\mathbf{x}_0) < \hat{T}_0(\mathbf{v}, \mathbf{w})(\mathbf{x}_0) + u_0(\mathbf{x}_0),$$

і не може бути виконана нерівність

$$\hat{T}_0(\mathbf{v} + \mathbf{u}, \mathbf{w} - \mathbf{u}) \geq \hat{T}_0(\mathbf{v}, \mathbf{w}) + u_0,$$

а тим більше не виконується нерівність

$$\hat{T}(\mathbf{v} + \mathbf{u}, \mathbf{w} - \mathbf{u}) \geq \hat{T}(\mathbf{v}, \mathbf{w}) + \mathbf{u}.$$

Отже, справджується така теорема.

**Теорема 2.** Нехай  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  — сильно інваріантний конусний відрізок для гетеротонного оператора  $\mathbf{T}$  вигляду (7) з супровідним оператором  $\hat{\mathbf{T}}$  вигляду (12) і має місце умова (23). Тоді ітераційний процес (17) – (19) двобічно збігається у нормі простору  $C_n(\bar{\Omega})$  до єдиного на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  неперервного додатного розв'язку  $\mathbf{u}^*$  крайової задачі (1) – (3).

Розглянемо ще одну умову, яка забезпечить рівність  $\mathbf{v}^* = \mathbf{w}^*$ . Нехай функції  $f_i(\mathbf{x}, v_1, \dots, v_n, w_1, \dots, w_n)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , для всіх чисел  $v_1, \dots, v_n, w_1, \dots, w_n$  таких, що  $0 < v_i, w_i < M_0^i$ , де  $M_0^i = \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} w_i^0(\mathbf{x})$ ,  $i = 1, \dots, n$ , і для всіх  $\mathbf{x} \in \Omega$  задовольняють нерівності

$$\left| f_i(\mathbf{x}, v_1, \dots, v_n, w_1, \dots, w_n) - f_i(\mathbf{x}, w_1, \dots, w_n, v_1, \dots, v_n) \right| \leq L_i \max\{|v_1 - w_1|, \dots, |v_n - w_n|\}, \quad (25)$$

де  $L_i > 0$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

Тоді

$$\begin{aligned} \|\mathbf{w}^{(k+1)} - \mathbf{v}^{(k+1)}\|_n &= \left\| \hat{\mathbf{T}}(\mathbf{w}^{(k)}, \mathbf{v}^{(k)}) - \hat{\mathbf{T}}(\mathbf{v}^{(k)}, \mathbf{w}^{(k)}) \right\|_n = \\ &= \max_{i=1, \dots, n} \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} [\hat{T}_i(\mathbf{w}^{(k)}, \mathbf{v}^{(k)})(\mathbf{x}) - \hat{T}_i(\mathbf{v}^{(k)}, \mathbf{w}^{(k)})(\mathbf{x})] = \\ &= \max_{i=1, \dots, n} \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) [f_i(\mathbf{s}, \mathbf{w}^{(k)}(\mathbf{s}), \mathbf{v}^{(k)}(\mathbf{s})) - \\ &\quad - f_i(\mathbf{s}, \mathbf{v}^{(k)}(\mathbf{s}), \mathbf{w}^{(k)}(\mathbf{s}))] ds \leq \\ &\leq \max_{i=1, \dots, n} \left[ L_i \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) ds \right] \cdot \max_{i=1, \dots, n} \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} [w_i^{(k)}(\mathbf{x}) - v_i^{(k)}(\mathbf{x})] = \\ &= \max_{i=1, \dots, n} \{L_i M_i\} \cdot \|\mathbf{w}^{(k)} - \mathbf{v}^{(k)}\|_n, \end{aligned}$$

де  $M_i = \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) ds$ .

Звідси матимемо, що

$$\|\mathbf{w}^{(k+1)} - \mathbf{v}^{(k+1)}\|_n \leq \gamma^{k+1} \|\mathbf{w}^{(0)} - \mathbf{v}^{(0)}\|_n,$$

де  $\gamma = \max_{i=1, \dots, n} \{L_i M_i\}$ .

Отже, рівність  $\mathbf{v}^* = \mathbf{w}^*$  матиме місце, якщо  $\gamma = \max_{i=1, \dots, n} \{L_i M_i\} < 1$ , і тоді справджується теорема.

**Теорема 3.** Нехай  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  — сильно інваріантний конусний відрізок для гетеротонного оператора  $\mathbf{T}$  вигляду (7) з супровідним оператором  $\hat{\mathbf{T}}$  вигляду (12) і має місце умова (25), причому  $\gamma = \max_{i=1, \dots, n} \{L_i M_i\} < 1$ , де  $M_i = \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) ds$ . Тоді ітераційний процес (17) – (19) двобічно збігається у нормі простору  $C_n(\bar{\Omega})$  до єдиного на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  неперервного додатного розв'язку  $\mathbf{u}^*$  крайової задачі (1) – (3).

І нарешті, ще однією умовою того, що система рівнянь (20), (21) не має на сильно інваріантному конусному відріжку  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  розв'язків таких, що  $\mathbf{v} \neq \mathbf{w}$ , є умова  $\mathbf{u}_0$ -псевдоувігнутості гетеротонного оператора  $\mathbf{T}$  вигляду (7) з супровідним оператором  $\hat{\mathbf{T}}$  вигляду (12). Тоді з огляду на твердження г) леми 1 приходимо до такого результату.

**Теорема 4.** Нехай  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle \subset \mathbf{K}(\mathbf{u}_0)$  — сильно інваріантний конусний відрізок для гетеротонного оператора  $\mathbf{T}$  вигляду (7) з супровідним оператором  $\hat{\mathbf{T}}$  вигляду (12) і має місце умова (14). Тоді ітераційний процес (17) – (19) двобічно збігається у нормі простору  $C_n(\bar{\Omega})$  до єдиного на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  неперервного додатного розв'язку  $\mathbf{u}^*$  крайової задачі (1) – (3).

На  $k$ -й ітерації за наближений розв'язок крайової задачі (1) – (3) приймаємо вектор-функцію

$$\mathbf{u}^{(k)}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{w}^{(k)}(\mathbf{x}) + \mathbf{v}^{(k)}(\mathbf{x})). \quad (26)$$

З огляду на ланцюг нерівностей (22) ми матимемо оцінку похибки для наближеного розв'язку (26):

$$\|\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^{(k)}\|_n \leq \frac{1}{2} \max_{i=1, \dots, n} \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} (w_i^{(k)}(\mathbf{x}) - v_i^{(k)}(\mathbf{x})). \quad (27)$$

Наявність зручної апостеріорної оцінки вигляду (27) є безумовною перевагою побудованого двобічного ітераційного процесу.

Отже, якщо задана точність  $\varepsilon > 0$ , то ітераційний процес слід проводити до виконання нерівності

$$\max_{i=1, \dots, n} \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} (w_i^{(k)}(\mathbf{x}) - v_i^{(k)}(\mathbf{x})) < 2\varepsilon$$

і з точністю  $\varepsilon$  можна вважати, що  $\mathbf{u}^*(\mathbf{x}) \approx \mathbf{u}^{(k)}(\mathbf{x})$ .

Крім того, за умов теореми 3 можна записати і апіорну оцінку похибки:

$$\|\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^{(k)}\|_n \leq \frac{\gamma^k}{2} \max_{i=1, \dots, n} \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} (w_i^0(\mathbf{x}) - v_i^0(\mathbf{x})).$$

Тоді з нерівності

$$\|\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^{(k)}\|_n \leq \frac{\gamma^k}{2} \max_{i=1, \dots, n} \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} (w_i^0(\mathbf{x}) - v_i^0(\mathbf{x})) < \varepsilon$$

знаходимо, що для досягнення точності  $\varepsilon$  треба зробити

$$k_0(\varepsilon) = \left\lceil \frac{\ln \frac{\max_{i=1, \dots, n} \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} (w_i^0(\mathbf{x}) - v_i^0(\mathbf{x}))}{2\varepsilon}}{\ln \frac{1}{\max_{i=1, \dots, n} \{L_i M_i\}}} \right\rceil + 1$$

ітерацій, де квадратні дужки позначають цілу частину числа.

Сильно інваріантний конусний відрізок  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$ , який виділяється умовами (15), (16), є апіорною оцінкою невідомого точного розв'язку  $\mathbf{u}^*$ . Для його побудови можуть бути використані загальні рекомендації, розглянуті у [12].

Оскільки шуканий розв'язок  $\mathbf{u}(\mathbf{x})$  задовольняє умову (3.3) і вектор-функція  $\mathbf{u}_0(\mathbf{x})$  теж набуває на  $\partial\Omega$  нульові значення, то сильно інваріантний конусний відрізок  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  можна шукати у вигляді

$$\begin{aligned} < \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 > = < \alpha \mathbf{u}_0, \beta \mathbf{u}_0 > \\ = < (\alpha_1 u_0^1, \dots, \alpha_n u_0^n), (\beta_1 u_0^1, \dots, \beta_n u_0^n) >, \end{aligned}$$

де  $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ ,  $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_n)$ ,  $0 < \alpha_i < \beta_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Умови (15), (16) призводять до системі нерівностей

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, \alpha_1 u_0^1(\mathbf{s}), \dots, \alpha_n u_0^n(\mathbf{s}), \beta_1 u_0^1(\mathbf{s}), \dots, \beta_n u_0^n(\mathbf{s})) ds &\geq \\ &\geq \alpha_i u_0^i(\mathbf{x}) \text{ для всіх } \mathbf{x} \in \bar{\Omega}, \\ \int_{\Omega} G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, \beta_1 u_0^1(\mathbf{s}), \dots, \beta_n u_0^n(\mathbf{s}), \alpha_1 u_0^1(\mathbf{s}), \dots, \alpha_n u_0^n(\mathbf{s})) ds &\leq \\ &\leq \beta_i u_0^i(\mathbf{x}) \text{ для всіх } \mathbf{x} \in \bar{\Omega}, \\ &i = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Останню систему нерівностей можна привести до вигляду

$$\alpha_i \leq \min_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} h_1^i(\mathbf{x}; \alpha, \beta), \quad (28)$$

$$\beta_i \geq \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} h_2^i(\mathbf{x}; \alpha, \beta), \quad i = 1, \dots, n, \quad (29)$$

де

$$\begin{aligned} h_1^i(\mathbf{x}; \alpha, \beta) &= \int_{\Omega} \frac{G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s})}{u_0^i(\mathbf{x})} \hat{f}_i(\mathbf{s}, \alpha \mathbf{u}_0(\mathbf{s}), \beta \mathbf{u}_0(\mathbf{s})) ds, \quad i = 1, \dots, n, \\ h_2^i(\mathbf{x}; \alpha, \beta) &= \int_{\Omega} \frac{G_i(\mathbf{x}, \mathbf{s})}{u_0^i(\mathbf{x})} \hat{f}_i(\mathbf{s}, \beta \mathbf{u}_0(\mathbf{s}), \alpha \mathbf{u}_0(\mathbf{s})) ds, \quad i = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Для більш швидкої збіжності ітераційного процесу (17) – (19) величина

$$\max_{i=1, \dots, n} \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} (w^0(\mathbf{x}) - v^0(\mathbf{x})) = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ (\beta_i - \alpha_i) \max_{\mathbf{x} \in \bar{\Omega}} u_0^i(\mathbf{x}) \right\}$$

має бути якомога меншою, а отже, при практичній реалізації методу двобічних ітерацій для кожного  $i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , слід взяти найбільше  $\alpha_i$  і найменше  $\beta_i$ , що задовольняють нерівностям (28), (29).

### 3. Побудова методу двобічних ітерацій на основі використання квазіфункції Гріна-Рвачова

Розроблений у п. 2 метод двобічних ітерацій розв'язання задачі Діріхле для систем нелінійних еліптичних рівнянь має багато переваг (зокрема, проста обчислювальна схема, зручна апостеріорна оцінка похибки тощо), але його суттєвим недоліком є необхідність знати аналітичний вираз для функції Гріна, що можливо лише для обмеженої кількості еліптичних диференціальних операторів у невеликій кількості областей. Щоб подолати цей недолік розробимо метод двобічних наближень, який базується на використанні квазіфункції Гріна-Рвачова [8].

Нехай  $G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s})$  – квазіфункція Гріна-Рвачова першої крайової задачі для оператора  $A_i$ , що задається рівністю

$$A_i u \equiv -\text{div}(p_i(\mathbf{x}) \nabla u) + q_i(\mathbf{x}) u, \quad i = 1, \dots, n.$$

Областю визначення цих операторів вважаємо множину функцій  $D_{A_i}$ , яка складається з функцій  $u \in C^2(\Omega) \cap C(\bar{\Omega})$  таких, що  $u|_{\partial\Omega} = 0$  і  $A_i u \in L_2(\Omega)$ .

Отже,

$$G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = g_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) - \tilde{g}_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}), \quad i = 1, \dots, n,$$

де  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ ,  $\mathbf{s} = (s_1, s_2)$  у випадку  $\mathbb{R}^2$  і  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ ,  $\mathbf{s} = (s_1, s_2, s_3)$  у випадку  $\mathbb{R}^3$ ;  $g_i(\mathbf{x}, \mathbf{s})$  – фундаменталь-

ний розв'язок рівняння  $-\text{div}(p_i(\mathbf{x}) \nabla u) + q_i(\mathbf{x}) u = 0$ ,  $\mathbf{x} \in \Omega$ ;  $\tilde{g}_i(\mathbf{x}, \mathbf{s})$  – симетрична ( $\tilde{g}_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = \tilde{g}_i(\mathbf{s}, \mathbf{x})$ ) двічі диференційована у  $\Omega \times \Omega$  функція така, що  $\tilde{g}_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = g_i(\mathbf{x}, \mathbf{s})$ , якщо  $\mathbf{x} \in \partial\Omega$  чи  $\mathbf{s} \in \partial\Omega$ .

Тоді, замінюючи кожне з рівнянь системи (1) – (3) еквівалентним інтегральним рівнянням, отримаємо, що задача (1) – (3) еквівалентна системі  $n$  інтегральних рівнянь Гаммерштейна

$$\begin{aligned} u_i(\mathbf{x}) &= \int_{\Omega} K_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) u_i(\mathbf{s}) ds + \\ &+ \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) f_i(\mathbf{s}, u_1(\mathbf{s}), \dots, u_n(\mathbf{s})) ds, \quad i = 1, \dots, n, \quad (30) \end{aligned}$$

де позначено

$$K_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = A_{i,s} \tilde{g}_i(\mathbf{x}, \mathbf{s});$$

$$A_{i,s} u \equiv -\text{div}(p_i(\mathbf{s}) \nabla u) + q_i(\mathbf{s}) u.$$

Систему нелінійних інтегральних рівнянь (30) можна також подати у вигляді векторного рівняння Урсона

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} \mathbf{P}(\mathbf{x}, \mathbf{s}, \mathbf{u}(\mathbf{s})) ds, \quad (31)$$

де

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(\mathbf{x}, \mathbf{s}, \mathbf{u}(\mathbf{s})) &= \\ &= (P_1(\mathbf{x}, \mathbf{s}, u_1(\mathbf{s}), \dots, u_n(\mathbf{s})), \dots, P_n(\mathbf{x}, \mathbf{s}, u_1(\mathbf{s}), \dots, u_n(\mathbf{s}))), \\ P_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}, u_1(\mathbf{s}), \dots, u_n(\mathbf{s})) &= K_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) u_i(\mathbf{s}) + \\ &+ G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) f_i(\mathbf{s}, u_1(\mathbf{s}), \dots, u_n(\mathbf{s})), \quad i = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Якщо крайова задача (1) – (3) має класичний розв'язок, то він задовольняє також систему рівнянь (30). Якщо ж класичний розв'язок задачі не існує, то систему рівнянь (30) можна використати для введення поняття узагальненого розв'язку крайової задачі (1) – (3).

Систему рівнянь (30) розглядатимемо у банаховому просторі  $C_n(\bar{\Omega})$ , напівупорядкованому конусом  $\mathcal{K}_+$ .

**Означення 2.** Розв'язком (узагальненим) задачі (1)–(3) називатимемо вектор-функцію  $\mathbf{u}^* \in \mathcal{K}_+$ , яка є розв'язком системи інтегральних рівнянь (30).

Побудуємо метод двобічних ітерацій знаходження розв'язку системи інтегральних рівнянь (3.30) (а отже, і розв'язку крайової задачі (1) – (3)).

Введемо у розгляд нелінійний інтегральний оператор  $\mathbf{T}$ , що діє у  $C_n(\bar{\Omega})$  за правилом, яке визначається правою частиною системи рівнянь (30) (чи (31))

$$\begin{aligned} \mathbf{T}(\mathbf{u})(\mathbf{x}) &= \int_{\Omega} \mathbf{P}(\mathbf{x}, \mathbf{s}, \mathbf{u}(\mathbf{s})) ds = \\ &= (T_1(\mathbf{u})(\mathbf{x}), \dots, T_n(\mathbf{u})(\mathbf{x})), \quad (32) \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} T_i(\mathbf{u})(\mathbf{x}) &= \int_{\Omega} P_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}, u_1(\mathbf{s}), \dots, u_n(\mathbf{s})) ds = \\ &= \int_{\Omega} K_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) u_i(\mathbf{s}) ds + \\ &+ \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) f_i(\mathbf{s}, u_1(\mathbf{s}), \dots, u_n(\mathbf{s})) ds. \quad (33) \end{aligned}$$

Оператор  $\mathbf{T}$  вигляду (32) можна подати у вигляді суми лінійного інтегрального оператора  $\mathbf{T}_1$ , що діє у  $C_n(\bar{\Omega})$  за правилом

$$\mathbf{T}_1(\mathbf{u})(\mathbf{x}) = \left( \int_{\Omega} K_1(\mathbf{x}, \mathbf{s}) u_1(\mathbf{s}) ds, \dots, \int_{\Omega} K_n(\mathbf{x}, \mathbf{s}) u_n(\mathbf{s}) ds \right),$$

і нелінійного оператора Гаммерштейна  $\mathbf{T}_2$ , що діє у  $C_n(\bar{\Omega})$  за правилом

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_2(\mathbf{u})(\mathbf{x}) &= \\ &= \left( \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^1(\mathbf{x}, \mathbf{s}) f_1(\mathbf{s}, u_1(\mathbf{s}), \dots, u_n(\mathbf{s})) ds, \dots, \right. \\ &\quad \left. \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^n(\mathbf{x}, \mathbf{s}) f_n(\mathbf{s}, u_1(\mathbf{s}), \dots, u_n(\mathbf{s})) ds \right). \end{aligned}$$

Завдяки умовам (5) та додатності кожної з квазіфункцій Гріна-Рвачова  $G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s})$  при  $\mathbf{x}, \mathbf{s} \in \Omega$  ( $\mathbf{x} \neq \mathbf{s}$ ),  $i = 1, \dots, n$ , можна стверджувати, що оператор  $\mathbf{T}_2$  є додатним оператором, бо він залишає інваріантним конус  $\mathcal{K}_+$ , але через те, що не має впевненості у знаку функцій  $K_i(\mathbf{x}, \mathbf{s})$  при  $\mathbf{x}, \mathbf{s} \in \Omega$  ( $\mathbf{x} \neq \mathbf{s}$ ),  $i = 1, \dots, n$ , питання про додатність оператора  $\mathbf{T}_1$  є відкритим. Отже, ми не можемо стверджувати, що додатним є оператор  $\mathbf{T}$ . Проте ж оператор  $\mathbf{T}$  вигляду (32) можна подати у вигляді різниці додатних операторів.

Для кожного  $i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , позначимо

$$\begin{aligned} K_+^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) &= \max\{0, K_i(\mathbf{x}, \mathbf{s})\}, \\ K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) &= \max\{0, -K_i(\mathbf{x}, \mathbf{s})\}. \end{aligned}$$

Зрозуміло, що  $K_+^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \geq 0$  і  $K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \geq 0$  при  $\mathbf{x}, \mathbf{s} \in \Omega$  ( $\mathbf{x} \neq \mathbf{s}$ ),  $i = 1, \dots, n$ . Тоді

$$\begin{aligned} K_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) &= K_+^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) - K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}), \\ |K_i(\mathbf{x}, \mathbf{s})| &= K_+^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) + K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}), \quad i = 1, \dots, n, \end{aligned}$$

і оператори  $T_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , вигляду (33) запишуться у так:

$$\begin{aligned} T_i(\mathbf{u})(\mathbf{x}) &= \int_{\Omega} K_+^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) u_i(\mathbf{s}) ds - \int_{\Omega} K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) u_i(\mathbf{s}) ds + \\ &+ \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) f_i(\mathbf{s}, u_1(\mathbf{s}), \dots, u_n(\mathbf{s})) ds. \end{aligned} \quad (34)$$

Нехай вектор-функція  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  дозволяє діагональне подання

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{u}) = (\hat{f}_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{u}), \dots, \hat{f}_n(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{u})),$$

причому неперервні за сукупністю змінних  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{w}$  функції  $\hat{f}_i(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{w}) = \hat{f}_i(\mathbf{x}, v_1, \dots, v_n, w_1, \dots, w_n)$  монотонно зростають за всіма  $v_i$  і монотонно спадають за всіма  $w_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , для всіх  $\mathbf{x} \in \Omega$ . Тоді оператор  $\mathbf{T}$  вигляду (32) буде гетеротонним з супровідним оператором

$$\hat{\mathbf{T}}(\mathbf{v}, \mathbf{w})(\mathbf{x}) = (\hat{T}_1(\mathbf{v}, \mathbf{w})(\mathbf{x}), \dots, \hat{T}_n(\mathbf{v}, \mathbf{w})(\mathbf{x})), \quad (35)$$

де

$$\begin{aligned} \hat{T}_i(\mathbf{v}, \mathbf{w})(\mathbf{x}) &= \int_{\Omega} K_+^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) v_i(\mathbf{s}) ds - \int_{\Omega} K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) w_i(\mathbf{s}) ds + \\ &+ \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, v_1(\mathbf{s}), \dots, v_n(\mathbf{s}), w_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s})) ds, \\ & \quad i = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (36)$$

Зрозуміло, що оператори  $\mathbf{T}$  і  $\hat{\mathbf{T}}$  є цілком неперервними, а оператор  $T_i$  вигляду (34) буде гетеротонним з супровідним оператором  $\hat{T}_i$  вигляду (36).

У конусі  $\mathcal{K}_+$  виділимо сильно інваріантний конусний відрізок  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$ ,  $\mathbf{v}^0 = (v_1^0, \dots, v_n^0)$ ,

$\mathbf{w}^0 = (w_1^0, \dots, w_n^0)$ , умовами: для всіх  $\mathbf{x} \in \bar{\Omega}$

$$\int_{\Omega} K_+^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) v_i^0(\mathbf{s}) ds - \int_{\Omega} K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) w_i^0(\mathbf{s}) ds + \quad (37)$$

$$+ \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, v_1^0(\mathbf{s}), \dots, v_n^0(\mathbf{s}), w_1^0(\mathbf{s}), \dots, w_n^0(\mathbf{s})) ds \geq v_i^0(\mathbf{x}),$$

$$\int_{\Omega} K_+^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) w_i^0(\mathbf{s}) ds - \int_{\Omega} K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) v_i^0(\mathbf{s}) ds + \quad (38)$$

$$+ \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, w_1^0(\mathbf{s}), \dots, w_n^0(\mathbf{s}), v_1^0(\mathbf{s}), \dots, v_n^0(\mathbf{s})) ds \leq w_i^0(\mathbf{x}),$$

$$i = 1, \dots, n.$$

Сформуємо далі ітераційний процес за схемою

$$\begin{aligned} v_i^{(k+1)}(\mathbf{x}) &= \int_{\Omega} K_+^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) v_i^{(k)}(\mathbf{s}) ds - \\ &- \int_{\Omega} K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) w_i^{(k)}(\mathbf{s}) ds + \end{aligned} \quad (39)$$

$$+ \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, v_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, v_n^{(k)}(\mathbf{s}), w_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, w_n^{(k)}(\mathbf{s})) ds,$$

$$\begin{aligned} w_i^{(k+1)}(\mathbf{x}) &= \int_{\Omega} K_+^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) w_i^{(k)}(\mathbf{s}) ds - \\ &- \int_{\Omega} K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) v_i^{(k)}(\mathbf{s}) ds + \end{aligned} \quad (40)$$

$$+ \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, w_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, w_n^{(k)}(\mathbf{s}), v_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, v_n^{(k)}(\mathbf{s})) ds,$$

$$i = 1, \dots, n, \quad k = 0, 1, 2, \dots;$$

$$v_i^{(0)}(\mathbf{x}) = v_i^0(\mathbf{x}), \quad w_i^{(0)}(\mathbf{x}) = w_i^0(\mathbf{x}), \quad i = 1, \dots, n. \quad (41)$$

Оскільки  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  – сильно інваріантний конусний відрізок для гетеротонного оператора  $\mathbf{T}$  вигляду (32), для якого оператор  $\hat{\mathbf{T}}$  вигляду (35) є супровідним, то можна зробити висновок, що послідовність  $\{\mathbf{v}^{(k)}(\mathbf{x})\}$  не спадає за конусом  $\mathcal{K}_+$ , а послідовність  $\{\mathbf{w}^{(k)}(\mathbf{x})\}$  не зростає за конусом  $\mathcal{K}_+$ . Тоді через нормальність конуса  $\mathcal{K}_+$  і повну неперервність оператора  $\hat{\mathbf{T}}$  існують границі  $\mathbf{v}^*(\mathbf{x})$  і  $\mathbf{w}^*(\mathbf{x})$  цих послідовностей. Отже, справджується ланцюг нерівностей

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^0 = \mathbf{v}^{(0)} &\leq \mathbf{v}^{(1)} \leq \dots \leq \mathbf{v}^{(k)} \leq \dots \leq \mathbf{v}^* \leq \\ &\leq \mathbf{w}^* \leq \dots \leq \mathbf{w}^{(k)} \leq \dots \leq \mathbf{w}^{(1)} \leq \mathbf{w}^{(0)} = \mathbf{w}^0. \end{aligned}$$

При цьому можливими є два випадки:  $\mathbf{v}^* < \mathbf{w}^*$  і  $\mathbf{v}^* = \mathbf{w}^*$ . У другому випадку  $\mathbf{u}^* := \mathbf{v}^* = \mathbf{w}^*$  – єдина на конусному відрізку  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  нерухома точка оператора  $\mathbf{T}$ , а отже,  $\mathbf{u}^*$  – єдиний на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  розв'язок крайової задачі (1) – (3).

Вектор-функції  $\mathbf{v}^* = (v_1^*, \dots, v_n^*)$  і  $\mathbf{w}^* = (w_1^*, \dots, w_n^*)$  є розв'язком системи з  $2n$  нелінійних інтегральних рівнянь вигляду

$$v_i(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} K_+^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) v_i(\mathbf{s}) ds - \int_{\Omega} K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) w_i(\mathbf{s}) ds + \quad (42)$$

$$+ \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, v_1(\mathbf{s}), \dots, v_n(\mathbf{s}), w_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s})) ds,$$

$$i = 1, \dots, n,$$

$$w_i(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} K_+^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) w_i(\mathbf{s}) ds - \int_{\Omega} K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) v_i(\mathbf{s}) ds + \quad (43)$$

$$+ \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \hat{f}_i(\mathbf{s}, w_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s}), v_1(\mathbf{s}), \dots, v_n(\mathbf{s})) ds,$$

$$i = 1, \dots, n.$$

Умовою виконання рівності  $\mathbf{v}^* = \mathbf{w}^*$  буде те, що система (42), (43) не має на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  таких розв'язків, що  $\mathbf{v} \neq \mathbf{w}$ .

Отже, має місце така теорема.

**Теорема 5.** Нехай  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  — сильно інваріантний конусний відрізок для гетеротонного оператора  $\mathbf{T}$  вигляду (32) з супровідним оператором  $\hat{\mathbf{T}}$  вигляду (35) і система рівнянь (42), (43) не має на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  розв'язків таких, що  $\mathbf{v} \neq \mathbf{w}$ . Тоді ітераційний процес (39) — (41) збігається у нормі простору  $\mathbf{C}_n(\bar{\Omega})$  до єдиного на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  неперервного додатного розв'язку  $\mathbf{u}^*$  крайової задачі (1) — (3), причому має місце ланцюг нерівностей

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^0 &= \mathbf{v}^{(0)} \leq \mathbf{v}^{(1)} \leq \dots \leq \mathbf{v}^{(k)} \leq \dots \leq \mathbf{u}^* \leq \\ &\leq \dots \leq \mathbf{w}^{(k)} \leq \dots \leq \mathbf{w}^{(1)} \leq \mathbf{w}^{(0)} = \mathbf{w}^0. \end{aligned} \quad (44)$$

Уточнимо теорему 5 за рахунок використання умов, за виконання яких система рівнянь (42), (43) не має на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  розв'язків таких, що  $\mathbf{v} \neq \mathbf{w}$ .

**Теорема 6.** Нехай  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  — сильно інваріантний конусний відрізок для гетеротонного оператора  $\mathbf{T}$  вигляду (32) з супровідним оператором  $\hat{\mathbf{T}}$  вигляду (35) і має місце умова: існує такий номер  $i_0$ ,  $1 \leq i_0 \leq n$ , що для будь-яких чисел  $v_1, \dots, v_n, w_1, \dots, w_n, u_1, \dots, u_n$ , таких, що  $0 < v_i < w_i$ ,  $0 < u_i < w_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , і для всіх  $\mathbf{x} \in \Omega$  має місце нерівність

$$\begin{aligned} \hat{f}_{i_0}(\mathbf{x}, v_1 + u_1, \dots, v_n + u_n, w_1 - u_1, \dots, w_n - u_n) < \\ < \hat{f}_{i_0}(\mathbf{x}, v_1, \dots, v_n, w_1, \dots, w_n) + \frac{u_{i_0}}{M_{i_0} + M_{i_0}^1}, \end{aligned} \quad (45)$$

де

$$M_{i_0} = \max_{\mathbf{x} \in \Omega} \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^{i_0}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) ds,$$

$$M_{i_0}^1 = \max_{\mathbf{x} \in \Omega} \int [K_+^{i_0}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) + K_-^{i_0}(\mathbf{x}, \mathbf{s})] ds.$$

Тоді ітераційний процес (39) — (41) двобічно збігається у нормі простору  $\mathbf{C}_n(\bar{\Omega})$  до єдиного на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  неперервного додатного розв'язку  $\mathbf{u}^*$  крайової задачі (1) — (3).

*Доведення.* Нехай  $\mathbf{w} - \mathbf{v} = (w_1 - v_1, \dots, w_n - v_n)$  і  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)$  — такі вектор-функції з  $\mathcal{K}_+ \setminus \{\theta\}$ , що

$$\mathbf{v}, \mathbf{w}, \mathbf{v} + \mathbf{u}, \mathbf{w} - \mathbf{u} \in \langle \mathbf{v}^{(1)}, \mathbf{w}^{(1)} \rangle. \quad (46)$$

Тоді з умов (46) витікає, що  $\mathbf{u}(\mathbf{x}) \geq \theta$  на  $\bar{\Omega}$  і  $\mathbf{u}|_{\partial\Omega} = \theta$ . Отже, якщо функція  $u_{i_0}(\mathbf{x})$  набуває максимального значення у точці  $\mathbf{x}_0 \in \Omega$ . Тоді

$$\begin{aligned} \hat{T}_{i_0}(\mathbf{v} + \mathbf{u}, \mathbf{w} - \mathbf{u})(\mathbf{x}_0) &= \\ &= \int_{\Omega} K_+^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) [v_{i_0}(\mathbf{s}) + u_{i_0}(\mathbf{s})] ds - \\ &- \int_{\Omega} K_-^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) [w_{i_0}(\mathbf{s}) - u_{i_0}(\mathbf{s})] ds + \\ &+ \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) \hat{f}_{i_0}(\mathbf{x}, v_1(\mathbf{s}) + u_1(\mathbf{s}), \dots, v_n(\mathbf{s}) + u_n(\mathbf{s}), \\ &w_1(\mathbf{s}) - u_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s}) - u_n(\mathbf{s})) ds < \\ < \int_{\Omega} K_+^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) v_{i_0}(\mathbf{s}) ds - \int_{\Omega} K_-^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) w_{i_0}(\mathbf{s}) ds + \\ &+ \int_{\Omega} [K_+^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) + K_-^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s})] u_{i_0}(\mathbf{s}) ds + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) \left[ \hat{f}_{i_0}(\mathbf{s}, v_1(\mathbf{s}), \dots, v_1(\mathbf{s}), w_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s})) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{u_{i_0}(\mathbf{s})}{M_{i_0} + M_{i_0}^1} \right] ds \leq \\ &\leq \int_{\Omega} K_+^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) v_{i_0}(\mathbf{s}) ds - \int_{\Omega} K_-^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) w_{i_0}(\mathbf{s}) ds + \\ &+ \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) \hat{f}_{i_0}(\mathbf{s}, v_1(\mathbf{s}), \dots, v_1(\mathbf{s}), w_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s})) ds + \\ &+ \frac{1}{M_{i_0} + M_{i_0}^1} \max_{\mathbf{x} \in \Omega} u_{i_0}(\mathbf{x}) \left[ \int_{\Omega} [K_+^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) + K_-^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s})] ds + \right. \\ &\quad \left. + \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) ds \right] \leq \\ &\leq \int_{\Omega} K_+^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) v_{i_0}(\mathbf{s}) ds - \int_{\Omega} K_-^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) w_{i_0}(\mathbf{s}) ds + \\ &+ \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^{i_0}(\mathbf{x}_0, \mathbf{s}) \hat{f}_{i_0}(\mathbf{s}, v_1(\mathbf{s}), \dots, v_1(\mathbf{s}), w_1(\mathbf{s}), \dots, w_n(\mathbf{s})) ds + \\ &\quad + u_{i_0}(\mathbf{x}_0) = \hat{T}_{i_0}(\mathbf{v}, \mathbf{w})(\mathbf{x}_0) + u_{i_0}(\mathbf{x}_0). \end{aligned}$$

Звідси випливає, що для оператора  $\hat{\mathbf{T}}$  не може бути виконана нерівність  $\hat{\mathbf{T}}(\mathbf{v} + \mathbf{u}, \mathbf{w} - \mathbf{u}) \geq \hat{\mathbf{T}}(\mathbf{v}, \mathbf{w}) + \mathbf{u}$ . Отже, система рівнянь (42), (43) не має на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  розв'язків таких, що  $\mathbf{v} \neq \mathbf{w}$ , і справджуватиметься теорема 5. Теорема 6 доведена.

Використаємо тепер ще одну умову, яка теж забезпечить рівність  $\mathbf{v}^* = \mathbf{w}^*$ . Нехай для кожного  $i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , існує таке число  $L_i > 0$ , що функція  $\hat{f}_i(\mathbf{x}, v_1, \dots, v_n, w_1, \dots, w_n)$  для всіх чисел  $v_1, \dots, v_n, w_1, \dots, w_n$  таких, що  $0 < v_i, w_i < M_0^i$ , де  $M_0^i = \max_{\mathbf{x} \in \Omega} w_i^0(\mathbf{x})$ ,  $i = 1, \dots, n$ , і для всіх  $\mathbf{x} \in \Omega$  задовольняє нерівність

$$\begin{aligned} \left| \hat{f}_i(\mathbf{x}, v_1, \dots, v_n, w_1, \dots, w_n) - \hat{f}_i(\mathbf{x}, w_1, \dots, w_n, v_1, \dots, v_n) \right| \leq \\ \leq L_i \max\{|v_1 - w_1|, \dots, |v_n - w_n|\}, \end{aligned} \quad (47)$$

Розглянемо різницю  $w_i^{(k+1)}(\mathbf{x}) - v_i^{(k+1)}(\mathbf{x})$ :

$$\begin{aligned} w_i^{(k+1)}(\mathbf{x}) - v_i^{(k+1)}(\mathbf{x}) &= \hat{T}_i(\mathbf{w}^{(k)}, \mathbf{v}^{(k)})(\mathbf{x}) - \hat{T}_i(\mathbf{v}^{(k)}, \mathbf{w}^{(k)})(\mathbf{x}) = \\ &= \int_{\Omega} [K_+^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) + K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s})] [w_i^{(k)}(\mathbf{s}) - v_i^{(k)}(\mathbf{s})] ds + \\ &+ \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) [\hat{f}_i(\mathbf{s}, w_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, w_n^{(k)}(\mathbf{s}), v_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, v_n^{(k)}(\mathbf{s})) - \\ &- \hat{f}_i(\mathbf{s}, v_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, v_n^{(k)}(\mathbf{s}), w_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, w_n^{(k)}(\mathbf{s}))] ds. \end{aligned}$$

Тоді з урахуванням нерівності (47) отримаємо оцінку

$$\begin{aligned} \|\mathbf{w}^{(k+1)} - \mathbf{v}^{(k+1)}\|_n &= \max_{i=1, \dots, n} \max_{\mathbf{x} \in \Omega} [w_i^{(k+1)}(\mathbf{x}) - v_i^{(k+1)}(\mathbf{x})] \leq \\ &\leq \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \max_{\mathbf{x} \in \Omega} \int_{\Omega} [K_+^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) + K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s})] [w_i^{(k)}(\mathbf{s}) - v_i^{(k)}(\mathbf{s})] ds + \right. \\ &+ \max_{\mathbf{x} \in \Omega} \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) [\hat{f}_i(\mathbf{s}, w_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, w_n^{(k)}(\mathbf{s}), v_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, v_n^{(k)}(\mathbf{s})) - \\ &\quad \left. - \hat{f}_i(\mathbf{s}, v_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, v_n^{(k)}(\mathbf{s}), w_1^{(k)}(\mathbf{s}), \dots, w_n^{(k)}(\mathbf{s}))] ds \right\} \leq \\ &\leq \max_{i=1, \dots, n} \{M_1^i + L_i M_i\} \cdot \max_{i=1, \dots, n} \max_{\mathbf{x} \in \Omega} [w_i^{(k)}(\mathbf{x}) - v_i^{(k)}(\mathbf{x})] = \\ &= \max_{i=1, \dots, n} \{M_1^i + L_i M_i\} \|\mathbf{w}^{(k)} - \mathbf{v}^{(k)}\|_n, \end{aligned}$$

де

$$M_i = \max_{\mathbf{x} \in \Omega} \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) ds, \quad (48)$$

$$M_i^1 = \max_{\mathbf{x} \in \Omega} \int_{\Omega} [K_+^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) + K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s})] ds, \quad i = 1, \dots, n. \quad (49)$$

Звідси матимемо, що

$$\|\mathbf{w}^{(k+1)} - \mathbf{v}^{(k+1)}\|_n \leq \gamma^{k+1} \|\mathbf{w}^{(0)} - \mathbf{v}^{(0)}\|_n,$$

де  $\gamma = \max_{i=1, \dots, n} \{M_1^i + L_i M_i\}$ .

Отже, рівність  $\mathbf{v}^* = \mathbf{w}^*$  матиме місце, якщо  $\gamma = \max_{i=1, \dots, n} \{M_1^i + L_i M_i\} < 1$ , і справджується така теорема.

**Теорема 7.** Нехай  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  – сильно інваріантний конусний відрізок для гетеротонного оператора  $\mathbf{T}$  вигляду (32) з супровідним оператором  $\hat{\mathbf{T}}$  вигляду (35) і має місце умова (47), причому  $\gamma = \max_{i=1, \dots, n} \{M_1^i + L_i M_i\} < 1$ , де сталі  $M_i$  і  $M_1^i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , визначаються рівностями (48) і (49) відповідно. Тоді ітераційний процес (39) – (41) двобічно збігається у нормі простору  $C_n(\bar{\Omega})$  до єдиного на  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$  неперервного додатного розв’язку  $\mathbf{u}^*$  крайової задачі (1) – (3).

Зауважимо, що не всі умови збіжності методу двобічних ітерацій з п. 2 переносяться на випадок системи рівнянь (30). Оскільки для кожного  $i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , різниця

$$\hat{T}_i \left( \tau \mathbf{v}, \frac{1}{\tau} \mathbf{w} \right) (\mathbf{x}) - \tau \hat{T}_i (\mathbf{v}, \mathbf{w}) (\mathbf{x}) = \left( \tau - \frac{1}{\tau} \right) \int_{\Omega} K_-^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) w_i(\mathbf{s}) ds + \int_{\Omega} G_{\text{quasi}}^i(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \left[ \hat{f}_i \left( \mathbf{s}, \tau \mathbf{v}(\mathbf{s}), \frac{1}{\tau} \mathbf{w}(\mathbf{s}) \right) - \tau \hat{f}_i(\mathbf{s}, \mathbf{v}(\mathbf{s}), \mathbf{w}(\mathbf{s})) \right] ds$$

для  $\tau$  близьких до нуля може приймати як завжди великі за модулем від’ємні значення незалежно від знаку виразу у квадратних дужках під другим інтегралом, то гетеротонний оператор  $\mathbf{T}$  вигляду (32) з супровідним оператором  $\hat{\mathbf{T}}$  вигляду (35) не буде навіть псевдоувігнутим.

Як і у методі двобічних ітерацій на основі використання функції Гріна, якщо виконано  $k$ -й ітерації, то за наближений розв’язок крайової задачі (1) – (3) слід взяти вектор-функцію (26). Тоді для похибки для наближеного розв’язку  $\mathbf{u}^{(k)}(\mathbf{x})$  ми матимемо апостеріорну оцінку вигляду (27).

Якщо задана точність  $\varepsilon > 0$ , то ітераційний процес слід проводити до виконання нерівності

$$\max_{i=1, \dots, n} \max_{\mathbf{x} \in \Omega} (w_i^{(k)}(\mathbf{x}) - v_i^{(k)}(\mathbf{x})) < 2\varepsilon$$

і тоді з точністю  $\varepsilon$  можна вважати, що  $\mathbf{u}^*(\mathbf{x}) \approx \mathbf{u}^{(k)}(\mathbf{x})$ .

Якщо ж виконуються умови теореми 7, то матиме місце і апіорна оцінка похибки:

$$\|\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^{(k)}\|_n \leq \frac{\gamma^k}{2} \max_{i=1, \dots, n} \max_{\mathbf{x} \in \Omega} (w_i^0(\mathbf{x}) - v_i^0(\mathbf{x})),$$

з якої знаходимо, що для досягнення точності  $\varepsilon$  треба зробити

$$k_0(\varepsilon) = \left\lceil \frac{\ln \frac{\max_{i=1, \dots, n} \max_{\mathbf{x} \in \Omega} (w_i^0(\mathbf{x}) - v_i^0(\mathbf{x}))}{2\varepsilon}}{\ln \frac{1}{\max_{i=1, \dots, n} \{M_1^i + L_i M_i\}}} \right\rceil + 1$$

ітерацій, де квадратні дужки позначають цілу частину числа.

Сильно інваріантний конусний відрізок  $\langle \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0 \rangle$ , який виділяється умовами (37), (38), є апіорною оцінкою невідомого точного розв’язку  $\mathbf{u}^*$ . Для його побудови можуть бути використані загальні рекомендації, розглянуті у п. 2 і у [12].

## Висновки

В роботі вперше проведено дослідження можливості побудови двобічних наближень до додатного розв’язку першої крайової задачі для системи нелінійних еліптичних рівнянь (1). При цьому розглянуто два підходи: один – на основі використання точної функції Гріна розглядуваної задачі, а другий – на основі використання квазіфункції Гріна-Рвачова. Отримано умови існування додатного розв’язку та умови двобічної збіжності до нього методу ітерацій. Отримані результати можуть бути використані у математичному моделюванні різноманітних стаціонарних нелінійних процесів у науці та техніці. Це і визначає наукову новизну та практичну значимість отриманих у роботі результатів.

**Список літератури:** 1. Pao C.V. Nonlinear parabolic and elliptic equations / C. V. Pao. – New York: Plenum Press, 1992. 2. Cui R. Uniqueness of the positive solution for a class of semilinear elliptic systems / R. Cui, Y. Wang, J. Shi // Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications. – 2007. – Vol. 67. – № 6. – P. 1710–1714. 3. Dalmasso R. Existence and uniqueness of positive radial solutions for the Lane–Emden system / R. Dalmasso // Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications. – 2004. – Vol. 57. – № 3. – P. 341–348. 4. Korman P. On Lane–Emden type systems / P. Korman, J. Shi // Discrete Contin. Dyn. Syst. – 2005. – P. 510–517. 5. Li C. A degree theory framework for semilinear elliptic systems / C. Li, J. Villavert // Proceedings of the American Mathematical Society. – 2016. – Vol. 144. – № 9. – P. 3731–3740. 6. Maniwa M. Uniqueness and existence of positive solutions for some semilinear elliptic systems / M. Maniwa // Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications. – 2004. – Vol. 59. – № 6. – P. 993–999. 7. Оноицев В.И. Нелинейные операторы в пространствах с конусом / В.И. Оноицев, Т.А. Хуродзе. – Тбилиси: Изд-во Тбилис. ун-та, 1984. – 246 с. 8. Сидоров М.В. Застосування методів функцій Гріна та квазіфункцій Гріна-Рвачова для побудови двобічних ітераційних процесів розв’язання нелінійних крайових задач / М.В. Сидоров // Вісник Запорізького національного університету. Серія: фізико-математичні науки. – 2017. – № 2. – С. 250–259. 9. Колосова С.В. О построении двусторонних приближений к положительному решению уравнения Лане-Эмдена / С.В. Колосова, В.С. Луханин, М.В. Сидоров // Вісник Запорізького національного університету. Серія: фізико-математичні науки. – 2015. – № 3. – С. 107–120. 10. Sidorov M.V. Construction of two-sided approximations to positive solutions of boundary value problems for semilinear elliptic systems / M.V. Sidorov // Journal of Numerical & Applied Mathematics. – 2017. – № 3 (126). – P. 110–123. 11. Sidorov M.V. Method of two-sided approximations for finding positive solutions of boundary value problems for semilinear elliptic systems: the use of the Green-Rvachev’s quasi-function / M.V. Sidorov // Journal of Numerical & Applied Mathematics. – 2018. – № 2 (128). – P. 96–113. 12. Сидоров М.В. Застосування конструктивних методів теорії R-функцій для побудови конусного відрізка при чисельній реалізації двобічних ітераційних методів / М.В. Сидоров // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. – 2017. – № 2 (89). – С. 43–49.

Надійшла до редколегії 25.04.2018

УДК 547.584:542.48



Олексій Повзун, Сергій Подкопаєв, Валерій Калиниченко, Світлана Вірич

Донецький національний технічний університет  
Україна, 85300, Донецька область, м. Покровськ, пл. Шибанкова, 2.  
Тел.: (06239) 2-03-09 e-mail: povzun.aleksey@gmail.com

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ «ДЬОГОТЬ — ПОЛІМЕР — НАПОВНЮВАЧ» ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ КОМП'ЮТЕРНОЇ АЛГЕБРИ MAPLE

Проведено математичне й комп'ютерне дослідження і оптимізацію системи «середовище, що модифікується (кам'яновугільний дьоготь), – полімер (відходи виробництва полівінілхлориду – відсів) – активний дисперсний наповнювач (відхід коксохімічного виробництва – кубові залишки очищення дисциляції фталевого ангідриду)». Розроблено математичну модель для оптимізації складу кам'яновугільних в'язучих, що містять кам'яновугільні дьогті, модифіковані відходами виробництва полівінілхлориду, які наповнені кубовими залишками очищення дисциляції фталевого ангідриду. У графічному редакторі системи комп'ютерної алгебри Maple побудовано тривимірні діаграми «параметри оптимізації системи – фактори варіювання» і визначено області допустимих значень оптимальних концентрацій полімеру та активного дисперсного наповнювача у кам'яновугільних в'язучих, які відповідають граничним значенням функцій відгуку.

**МОДЕЛЬ МАТЕМАТИЧНА, ДІАГРАМА ТРИВИМІРНА, ПАРАМЕТР ОПТИМІЗАЦІЇ, ФАКТОР ВАРІЮВАННЯ, ФУНКЦІЯ ВІДГУКУ**

**Oleksiy Povzun, Sergiy Podkopaev, Valeriy Kalynychenko, Svitlana Virych. Mathematical modeling of the system «tar – polymer – filler» by means of the system of computer algebra Maple.** The mathematical and computer research and optimization of the system "Modified medium (coal tar) – polymer (waste from PVC production) – active disperse filler (waste coke production – cube residues of distillation of phthalic anhydride)" are carried out. A mathematical model was developed for optimization of the composition of carbonaceous binders. Carbonaceous binders contain coal tar, modified with polyvinylchloride production residues, which are filled with cube residues of distillation of phthalic anhydride. The graphical editor of the computer system Maple built three-dimensional diagrams "system optimization parameters – variance factors". The areas of admissible values of optimal polymer concentrations and active disperse filler in carbonaceous binders, which correspond to the limiting value of the response function, is determined.

**MATHEMATICAL MODEL, THREE-DIMENSIONAL DIAGRAM, OPTIMIZATION PARAMETER, VARIATION FACTOR, RESPONSE FUNCTION**

**Алексей Повзун, Сергей Подкопаев, Валерий Калиниченко, Светлана Вирич. Математическое моделирование системы «деготь – полимер – наполнитель» с помощью системы компьютерной алгебры Maple.** Выполнены математическое и компьютерное исследование и оптимизация системы «модифицируемая среда, (каменноугольный дьоготь), – полимер (отходы производства поливинилхлорида – отсев) – активный дисперсный наполнитель (отход коксохимического производства – кубовые остатки очистки дисцилляции фталевого ангидрида)». Разработана математическая модель для оптимизации состава каменноугольных вяжущих, состоящих из каменноугольных дегтей, модифицированных отходами производства поливинилхлорида и наполненных кубовыми остатками очистки дисцилляции фталевого ангидрида. В графическом редакторе компьютерной системы Maple построены трехмерные диаграммы «параметры оптимизации системы – факторы варьирования» и определены области допустимых значений оптимальных концентраций полимера и активного дисперсного наполнителя в каменноугольных вяжущих, которые соответствуют граничным значениям функций отклика.

**МОДЕЛЬ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ, ДИАГРАММА ТРЕХМЕРНАЯ, ПАРАМЕТР ОПТИМИЗАЦИИ, ФАКТОР ВАРЬИРОВАНИЯ, ФУНКЦИЯ ОТКЛИКА**

### Вступ

Щорічний приріст частки багатотоннажних транспортних засобів у складі транспортних потоків на автомобільних дорогах потребує підвищення несучої здатності дорожнього одягу в цілому і верхнього його шару особливо. Під час експлуатації дорожні покриття піддаються значним зовнішнім діям: силовому впливу навантажень від коліс автомобілів, атмосферних опадів у вигляді дощу та снігу, а також постійним температурним змінам, поперемінному заморозуванню і відтаванню та ін.

В дорожніх покриттях виникають руйнування у вигляді лушення, викришування, вибоїн тощо.

З огляду на це бетон покриття автомобільної дороги і його складові мають витримувати більші навантаження, відповідати екологічним нормам, бути стійкими до корозії й забезпечувати безпеку на дорозі. Традиційні матеріали не можуть надати такої якості бетону, який би відповідав вимогам сучасного дорожнього руху.

Властивості бетону переважно визначає в'язуче, якість якого покращують різними способами,

одним з яких є модифікація кам'яновугільних до-  
рожніх дьогтів полімерами [1]. Більш ефективним  
прийомом фізико-хімічної структурної модифіка-  
ції органічних в'язучих коксохімічного виробни-  
цтва з метою максимальної реалізації їхніх потен-  
ційних властивостей є введення до їхнього складу  
комплексних добавок, які містять полімери, що  
суміщаються з ними, та активних дисперсних на-  
повнювачів [2].

### 1. Аналіз досліджень і публікацій

Встановлено, що серед полімерів, які вико-  
ристовують для модифікації кам'яновугільних  
в'язучих, значно поліпшують якість останніх по-  
лівінілхлорид (ПВХ) [3-5] та полістирол (ПС) (або  
деякі відходи їхнього виробництва) [6], [7].

Математичне моделювання технологічних ре-  
жимів приготування дьогтеполівінілхлоридного  
в'язучого виконано за допомогою регресійного  
аналізу [8]. Для цього було використано рівно-  
мірний симетричний квазіортогональний план  
для п'яти факторів на п'ятьох цілочисельних рів-  
нях (-2; -1; 0; +1; +2) [9]. Як критерій оптималь-  
ності планів було прийнято значення парного  
коефіцієнта кореляції між коефіцієнтами моделі  
( $\max |r(a_i, a_j)| \leq r_{кр}$ ), коефіцієнт розкиду, регуляр-  
ність і рівномірність.

Було вжито рівномірний план – оптимальний,  
 $r_{кр} \leq 0,3$ . Фактори варіювання:

- $X_1$  ( $t$ , °C) – температура розчинення відходу  
виробництва ПВХ (відсіву), 105-125°C;
- $X_2$  ( $\tau_p$ , с) – термін приготування дьогтеполіві-  
нілхлоридного в'язучого, 1800-5400 с;
- $X_3$  ( $m$ , %) – масова концентрація відсіву ПВХ,  
0,5-2,5%;
- $X_4$  ( $D$ , м<sup>2</sup>/кг) – дисперсність відсіву ПВХ, 300-  
500 м<sup>2</sup>/кг;
- $X_4$  ( $\varphi$ ) – пеко-антраценове відношення в  
кам'яновугільному дьогті, 1,02-1,42.

Параметрами оптимізації було прийнято:

- $Y_1$  ( $C$ ) – коефіцієнт аномалії в'язкості  
 $C = \lg \tau / \lg \gamma$  [10], де  $\tau$  – напруження зсуву, МПа;  
 $\gamma$  – швидкість деформування, с<sup>-1</sup>;  $C = 0,75-0,9$ ;
- $Y_2$  ( $K_{от}$ ) – коефіцієнт водостійкості дьогтепо-  
лівінілхлоридбетону при тривалому водонасичен-  
ні,  $K_{от} > 0,8$ .

Обробка результатів експерименту і визначен-  
ня коефіцієнтів рівнянь регресії з урахуванням їх-  
ньої значущості дозволила здобути поліноміальні  
моделі:

$$Y_1 = 0,726 - 0,050 \cdot X_1 + 0,018 \cdot X_2 + 0,022 \cdot X_3 + \\ 0,092 \cdot X_4 + 0,057 \cdot X_5 + 0,048 \cdot X_1^2 - 0,072 \cdot X_2^2 + \\ 0,089 \cdot X_3^2 - 0,032 \cdot X_4^2 - 0,012 \cdot X_5^2 + 0,067 \cdot X_1 \cdot X_3 + \\ 0,036 \cdot X_1 \cdot X_5 - 0,065 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,017 \cdot X_2 \cdot X_5 + \\ 0,017 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,040 \cdot X_3 \cdot X_5 + 0,025 \cdot X_4 \cdot X_5;$$

$$Y_2 = 0,638 - 0,030 \cdot X_1 + 0,065 \cdot X_2 - 0,041 \cdot X_3 + \\ 0,065 \cdot X_4 + 0,012 \cdot X_5 - 0,024 \cdot X_1^2 - 0,031 \cdot X_2^2 + \\ 0,082 \cdot X_3^2 - 0,049 \cdot X_4^2 + 0,065 \cdot X_5^2 + 0,031 \cdot X_1 \cdot X_2 + \\ 0,054 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,008 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,032 \cdot X_1 \cdot X_5 + \\ 0,009 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,034 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,019 \cdot X_2 \cdot X_5 + \\ 0,071 \cdot X_3 \cdot X_5$$

Одержані рівняння регресії адекватні і задо-  
вольняють критерію Фішера.

Аналіз залежностей параметрів оптимізації від  
факторів варіювання довів, що при приготуванні  
дьогтеполівінілхлоридного в'язучого слід рекомен-  
дувати такі значення факторів варіювання:

$$X_1 = 120-125^\circ\text{C}; X_2 = 3600 \text{ с}; X_3 = 1,5-2,5\%; \\ X_4 = 300-350 \text{ м}^2/\text{кг}; X_5 = 1,364-1,367 [8].$$

Математичне моделювання складу дьогтепо-  
лівінілхлоридного в'язучого проведено програм-  
ною мовою MathCAD з використанням пакета  
SURFER for Windows [11]. Як фактори варіювання  
було прийнято:

- $X_1$  ( $C_V$ , %) – об'ємна концентрація дисперс-  
ної фази кам'яновугільного дьогтю;
- $X_2$  ( $C_{ПВХ}$ , %) – масова концентрація відходу  
виробництва ПВХ (відсіву).

Як параметри оптимізації дьогтеполівінілхло-  
ридної системи були:

- $Y_1$  ( $T_p$ , °C) – температура розм'якшення дьог-  
теполівінілхлоридного в'язучого,  $T_p > 34^\circ\text{C}$ ;
- $Y_2$  ( $T_{кр}$ , °C) – температура крихкості дьогтепо-  
лівінілхлоридного в'язучого,  $T_{кр} < 13^\circ\text{C}$ ;
- $Y_3$  ( $E$ , %) – еластичність дьогтеполівінілхло-  
ридного в'язучого,  $E > 45\%$ .

Аналіз побудованих діаграм в координатах  
«масова концентрація відходу виробництва ПВХ  
( $X_2$ ) – об'ємна концентрація дисперсної фази  
кам'яновугільного дьогтю ( $X_1$ )», що характеризу-  
ють поведінку параметрів оптимізації при зміні  
керуваних факторів варіювання, які впливають на  
систему «дьоготь – ПВХ», дозволив апроксимува-  
ти криву температури розм'якшення поліномом  
другого ступеня, а криві температури крихкості і  
еластичності – описати неповним поліномом тре-  
тього ступеня ( $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  відповідно). Взаємозв'язок  
натурних значень факторів, що діють на дьогтепо-  
лівінілхлоридне в'язуче, і кодованих є таким [11]:

$$x_1 = \frac{X_1 - 28,5}{2,11}; x_2 = \frac{X_2 - 2,25}{1,75};$$

$$X_1 = C_V = 17,48 + 2,11 \cdot \ln(C_{30}^{10}),$$

де  $C$  – умовна в'язкість дьогтю, с; 10 – діаметр стіч-  
ного отвору, мм; 30 – температура витікання 50 мл  
в'язучого на стандартному віскозиметрі, °C.

$$Y_1 = 32,510 + 6,115 \cdot X_1 + 7,796 \cdot X_2 - 0,266 \cdot X_1 \cdot X_2 + \\ 0,161 \cdot X_1^2 - 1,331 \cdot X_2^2$$

$$Y_2 = -15,340 + 3,094 \cdot X_1 + 1,978 \cdot X_2 + 0,912 \cdot X_1 \cdot X_2 - \\ 1,156 \cdot X_1^2 + 1,570 \cdot X_2^2 + 1,031 \cdot X_1 \cdot X_2^2$$

$$Y_3 = 68,190 - 17,000 \cdot X_1 \cdot X_2 - 19,340 \cdot X_1^2 - 11,470 \cdot X_2^2 - \\ - 16,980 \cdot X_1^2 \cdot X_2 - 18,190 \cdot X_1^3 + 8,670 \cdot X_2^3.$$

На підставі побудованих залежностей параметрів оптимізації від кожного з кодованих факторів (з використанням рівнянь регресії) визначено оптимальну концентрацію відходу виробництва ПВХ у кам'яновугільному в'язучому, яка становить 1,5-2,0% за масою.

Математичне моделювання терміну приготування *дьюгтеполістирольного* в'язучого і визначення концентрації відходу виробництва полістиролу (полістирольного пилу – ПС) виконано за допомогою композиційного несиметричного плану на трьох цілочисельних рівнях (-1; 0; +1) [12].

Оптимальні склади системи «дьюготь – ПС» було визначено як оптимальні області допустимих значень факторів варіювання  $X_1, X_2, X_3$ :

–  $X_1$  ( $C_{30}^{10}$ , с) – умовна в'язкість кам'яновугільного дьюгтю, 50-250 с;

–  $X_2$  ( $C_{ПС}$ , %) – масова концентрація відходу виробництва ПС (полістирольного пилу), 0-10%.

–  $X_3$  ( $\tau_p$ , хвилини) – термін приготування *дьюгтеполістирольного* в'язучого, 5-145 хвилин.

Ці оптимальні області обмежені поверхнями рівня функції відгуку за кожним з параметрів оптимізації  $Y_1 - Y_6$ :

–  $Y_1$  ( $T_p$ , °C) – температура розм'якшення *дьюгтеполістирольного* в'язучого,  $T_p > 33^\circ\text{C}$ ;

–  $Y_2$  ( $E$ , %) – еластичність *дьюгтеполістирольного* в'язучого,  $E > 25\%$ ;

–  $Y_3$  ( $D_0$ , м) – дуктильність (розтяжність) *дьюгтеполістирольного* в'язучого при 0 °C,  $D_0 > 0,9$  м;

–  $Y_4$  ( $W$ , %) – водонасичення *дьюгтеполістиролбетону*,  $W < 2,0\%$ ;

–  $Y_5$  ( $R_{20}$ , МПа) – границя міцності *дьюгтеполістиролбетону* на стиск при 20°C,  $R_{20} > 2,2$  МПа;

–  $Y_6$  ( $K_{ст}$ ) – коефіцієнт водостійкості *дьюгтеполістиролбетону* при тривалому водонасиченні,  $K_{ст} > 0,75$ .

За критерій оптимальності плану прийнято критерій  $D$ -оптимальності, який пов'язаний з мінімізацією об'єму еліпсоїду розсіювання оцінок параметрів рівнянь регресії [13]. Для створеного плану експерименту за методом найменших квадратів обчислено коефіцієнти рівнянь регресії за виразом [14]:

$$b_i = (X^* \cdot X)^{-1} \cdot X^* \cdot Y,$$

де  $b_i$  – коефіцієнт рівняння регресії;  $X$  – матриця плану експерименту;  $X^*$  – транспонована матриця плану експерименту;  $(X^* \cdot X)^{-1}$  – матриця, обернена добутку матриці плану експерименту на його транспоновану матрицю;  $Y$  – вектор-стовпець результатів експерименту.

Обробка результатів експерименту і обчислення коефіцієнтів рівнянь регресії з урахуванням їх значущості дозволили одержати поліноміальні моделі.

Статистичний аналіз отриманих результатів містить перевірку двох статистичних гіпотез:

– про значущість отриманих коефіцієнтів моделі;

– про адекватність надання результатів експерименту здобутим рівнянням регресії [14], [15].

Рівняння регресії для кожного параметра оптимізації мають такий вигляд:

$$Y_1 = 28,97 + 4,90 \cdot X_1 + 6,79 \cdot X_2 + 0,003 \cdot X_3 - 1,03 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,06 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,014 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,70 \cdot X_1^2 - 3,24 \cdot X_2^2 - 1,22 \cdot X_3^2;$$

$$Y_2 = 14,9 - 1,09 \cdot X_1 + 3,39 \cdot X_2 - 2,28 \cdot X_3 - 0,24 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,054 \cdot X_1 \cdot X_3 - 2,07 \cdot X_2 \cdot X_3 + 3,91 \cdot X_1^2 - 9,65 \cdot X_2^2 - 6,24 \cdot X_3^2;$$

$$Y_3 = 0,879 - 0,010 \cdot X_1 - 0,098 \cdot X_2 - 0,384 \cdot X_3 - 0,043 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,046 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,089 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,311 \cdot X_1^2 - 0,135 \cdot X_2^2 - 0,614 \cdot X_3^2;$$

$$Y_4 = 2,00 - 0,65 \cdot X_3 + 4,55 \cdot X_1 \cdot X_3 + 9,08 \cdot X_2 \cdot X_3 + 31,50 \cdot X_1^2 - 13,74 \cdot X_2^2 + 0,65 \cdot X_3^2;$$

$$Y_5 = 2,222 - 0,083 \cdot X_1 - 0,075 \cdot X_2 + 0,426 \cdot X_3 - 0,062 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,050 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,033 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,072 \cdot X_1^2 - 0,130 \cdot X_2^2 - 0,086 \cdot X_3^2;$$

$$Y_6 = 0,789 - 0,025 \cdot X_1 - 0,058 \cdot X_2 + 0,106 \cdot X_3 - 0,057 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,014 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,048 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,036 \cdot X_1^2 - 0,069 \cdot X_2^2 - 0,091 \cdot X_3^2.$$

Обробка одержаних рівнянь регресії за допомогою програм STAGRAPHICS Plus дозволила представити дані графічно – отримати поверхні відгуків зміни досліджуваних параметрів оптимізації від змінних факторів варіювання, тобто шляхом застосування методу планування експерименту було розроблено трифакторну модель.

Доведено, що оптимальною системою «дьюготь – полістирол» є при умовній в'язкості дьюгтю за  $C_{30}^{10}$  ( $X_1$ ) 75-250 с, масовій концентрації полістиролу ( $X_2$ ) 4,0-6,0% та терміні приготування *дьюгтеполістирольного* в'язучого ( $X_3$ ) впродовж 70-80 хвилин.

Модифікація кам'яновугільних дьюгтів лише відходами виробництва полівінілхлориду або полістиролу підвищує в'язкість в'язучих не суттєво. Малов'язкі кам'яновугільні в'язучі, у яких енергія теплового руху дисперсійного середовища ( $\gamma$ -фракція) дорівнює або більша за енергію зв'язку у вузлах макромолекулярної полімерної сітки, утвореної за рахунок механічного зачеплення і переплетіння надмолекулярних структур полімеру, слід зміцнювати ліофільними активними дисперсними наповнювачами. Адсорбційна взаємодія полімерних молекул з твердими наповнювачами на границі розділу фаз зменшує рухливість макроланцюгів, що призводить до зміцнення модифікованої системи. Такими наповнювачами-відходами з високою структуруючою здатністю в дьюгтеполімерних в'язучих можуть бути, наприклад, деревний гідролізний лігнін, кубові залишки очищення дисципліни фталевого ангїдриду, сажа тощо.

В роботі [16] викладено математичне моделювання системи «дьюготь – полівінілхлорид (ПВХ) – деревний гідролізний лігнін (ДГЛ)». Фактори варіювання:



–  $X_1$  ( $C_{30}^{10}$ , с) – умовна в'язкість кам'яно-вугільного дьогтю, 50-250 с;

–  $X_2$  ( $C_{ПВХ}$ , %) – масова концентрація відходу виробництва ПВХ (відсіву), 0-2%.

–  $X_3$  ( $C_{ДГЛ}$ , %) – масова концентрація ДГЛ, 0-40%.

Параметри оптимізації:

–  $Y_1$  ( $C_m$ , %) – оптимальний вміст в'язучого в суміші,  $C_m < 8,5\%$ ;

–  $Y_2$  ( $T_p$ , °C) – температура розм'якшення в'язучого,  $T_p > 33^\circ\text{C}$ ;

–  $Y_3$  ( $E$ , %) – еластичність в'язучого,  $E > 25\%$ ;

–  $Y_4$  ( $R_{20}$ , МПа) – границя міцності дьогтеполі-вінілхлориду на стиск при  $20^\circ\text{C}$ ,  $R_{20} > 2,5$  МПа;

–  $Y_5$  ( $R_{50}$ , МПа) – границя міцності дьогтеполі-вінілхлориду на стиск при  $50^\circ\text{C}$ ,  $R_{50} > 1,0$  МПа;

–  $Y_6$  ( $R_0$ , МПа) – границя міцності дьогтеполі-вінілхлориду на стиск при  $0^\circ\text{C}$ ,  $R_0 < 12,0$  МПа;

–  $Y_7$  ( $K_{вт}$ ) – коефіцієнт водостійкості дьогтеполі-вінілхлоридбетону при тривалому водонасиченні,  $K_{вт} > 0,8$ ;

–  $Y_8$  ( $\tau^*/\tau_{cm}$ ) – відношення напруження зсуву  $\tau^*$  в'язучого до напруження сталої течії  $\tau_{cm}$ ,  $\tau^*/\tau_{cm} = 1,1-1,4$ .

Рівняння регресії для кожного параметра оптимізації мають такий вигляд:

$$Y_1 = 8,239 + 0,217 \cdot X_1 + 0,094 \cdot X_2 + 1,992 \cdot X_3 + 0,076 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,055 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,071 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,133 \cdot X_1^2 + 0,020 \cdot X_2^2 + 0,986 \cdot X_3^2;$$

$$Y_2 = 28,335 + 3,812 \cdot X_1 + 4,931 \cdot X_2 + 6,950 \cdot X_3 - 1,501 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,309 \cdot X_1 \cdot X_3 - 2,115 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,674 \cdot X_1^2 - 0,079 \cdot X_2^2 - 1,453 \cdot X_3^2;$$

$$Y_3 = 13,572 + 3,016 \cdot X_1 + 24,575 \cdot X_2 - 10,111 \cdot X_3 + 1,112 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,755 \cdot X_1 \cdot X_3 - 8,160 \cdot X_2 \cdot X_3 + 4,394 \cdot X_1^2 + 1,192 \cdot X_2^2 + 7,870 \cdot X_3^2;$$

$$Y_4 = 2,751 + 0,311 \cdot X_1 + 0,693 \cdot X_2 + 0,592 \cdot X_3 - 0,122 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,154 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,186 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,113 \cdot X_1^2 + 0,098 \cdot X_2^2 - 0,131 \cdot X_3^2;$$

$$Y_5 = 0,938 + 0,060 \cdot X_1 + 0,274 \cdot X_2 + 0,158 \cdot X_3 + 0,001 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,016 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,102 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,012 \cdot X_1^2 - 0,343 \cdot X_2^2 - 0,050 \cdot X_3^2;$$

$$Y_6 = 9,061 + 1,367 \cdot X_1 + 1,838 \cdot X_2 + 2,324 \cdot X_3 - 0,343 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,524 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,326 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,611 \cdot X_1^2 - 0,460 \cdot X_2^2 - 0,759 \cdot X_3^2;$$

$$Y_7 = 0,809 + 0,032 \cdot X_1 + 0,085 \cdot X_2 + 0,023 \cdot X_3 - 0,024 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,006 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,001 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,027 \cdot X_1^2 - 0,349 \cdot X_2^2 - 0,023 \cdot X_3^2;$$

$$Y_8 = 1,126 + 0,0 \cdot X_1 + 0,108 \cdot X_2 + 0,157 \cdot X_3 - 0,033 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,0 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,094 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,133 \cdot X_1^2 - 0,0 \cdot X_2^2 - 0,0 \cdot X_3^2.$$

Відповідно до отриманих рівнянь регресії у тривимірному просторі побудовано діаграми поверхонь функцій відгуку, які показують залежність відповідного параметра оптимізації ( $Y_1 - Y_8$ ), від:

а) умовної в'язкості дьогтю за  $C_{30}^{10}$  ( $X_1$ );

б) масової концентрації полівінілхлориду ( $X_2$ );

в) масової концентрації деревного гідролізного лігніну ( $X_3$ ).

Доведено, що оптимальними концентраціями полівінілхлориду в кам'яновугільних дьогтях є ( $X_2$ ) 1,4-1,6% ПВХ, а деревного гідролізного лігніну – ( $X_3$ ) 22-26% ДГЛ. В'язкість вихідного кам'яновугільного дьогтю ( $X_1$ ) становить  $C_{30}^{10} = 170-250$  с.

В роботі [17] надано розроблену математичну модель для оптимізації системи «дьоготь – полістирол (ПС) – деревний гідролізний лігнін (ДГЛ)» (з використанням методу експериментально-статистичного моделювання та побудовою тривимірних діаграм). Фактори варіювання та параметри оптимізації – такі самі, що і в роботі [16]. Одержано такі рівняння регресії:

$$Y_1 = 8,062 + 0,161 \cdot X_1 - 0,051 \cdot X_2 + 2,087 \cdot X_3 + 0,031 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,012 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,007 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,176 \cdot X_1^2 + 0,216 \cdot X_2^2 + 0,738 \cdot X_3^2;$$

$$Y_2 = 33,801 + 4,413 \cdot X_1 + 4,497 \cdot X_2 + 7,634 \cdot X_3 - 1,343 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,966 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,133 \cdot X_2 \cdot X_3 - 4,973 \cdot X_1^2 + 0,443 \cdot X_2^2 - 5,211 \cdot X_3^2;$$

$$Y_3 = 33,831 + 0,462 \cdot X_1 + 21,069 \cdot X_2 - 1,093 \cdot X_3 + 0,929 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,691 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,620 \cdot X_2 \cdot X_3 + 1,876 \cdot X_1^2 - 11,088 \cdot X_2^2 - 3,969 \cdot X_3^2;$$

$$Y_4 = 2,736 + 0,383 \cdot X_1 + 0,570 \cdot X_2 + 0,486 \cdot X_3 + 0,056 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,096 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,066 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,255 \cdot X_1^2 + 0,079 \cdot X_2^2 - 0,101 \cdot X_3^2;$$

$$Y_5 = 0,918 + 0,092 \cdot X_1 + 0,198 \cdot X_2 + 0,149 \cdot X_3 + 0,033 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,059 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,076 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,016 \cdot X_1^2 - 0,124 \cdot X_2^2 - 0,012 \cdot X_3^2;$$

$$Y_6 = 9,325 + 1,538 \cdot X_1 + 2,139 \cdot X_2 + 1,723 \cdot X_3 - 0,277 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,108 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,180 \cdot X_2 \cdot X_3 - 1,365 \cdot X_1^2 - 0,459 \cdot X_2^2 + 0,031 \cdot X_3^2;$$

$$Y_7 = 0,826 + 0,016 \cdot X_1 + 0,086 \cdot X_2 + 0,051 \cdot X_3 - 0,040 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,006 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,025 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,08 \cdot X_1^2 - 0,045 \cdot X_2^2 - 0,002 \cdot X_3^2.$$

Рівняння регресії характеризуються такими статистичними параметрами: дисперсія адекватності  $S = 0,016$ ; коефіцієнт варіації  $\delta = 2,34\%$ ; кореляційне відношення  $KB = 0,984$ .

Враховуючи граничні значення функцій відгуку всіх параметрів оптимізації ( $Y_1 - Y_7$ ), доведено, що оптимальною системою «кам'яновугільний дьоготь – полістирол – деревний гідролізний лігнін» буде за умовною в'язкістю дьогтю ( $X_1$ )  $C_{30}^{10} = 150-220$  с, масовій концентрації полістиролу ( $X_2$ ) 4,0-4,4% ПС та масовій концентрації деревного гідролізного лігніну ( $X_3$ ) 20-21% (ДГЛ).

## 2. Формулювання цілі та завдань дослідження

В даній роботі виконано математичне моделювання комплексного кам'яновугільного в'язучого за допомогою системи комп'ютерної алгебри Maple [18], яка являє собою ядро, доповнене різними бібліотеками і містить близько 2500 команд і функцій. Maple призначена для автоматизації математичних розрахунків різної складності. Розв'язання задач виходить в аналітичному вигляді (у вигляді формул), зокрема, – кількісно.

Система Maple виконує складні аналітичні перетворення; обчислює інтеграли, границі, кінцеві і нескінченні доданки та добутки; вирішує алгебраїчні, трансцендентні та диференціальні рівняння, нерівності і системи [18].

Метою роботи є розроблення математичної моделі для оптимізації трикомпонентної технологічної системи «кам'яновугільний дьоготь – полівінілхлорид (ПВХ) – кубові залишки очищення дисциляції фталевого ангідриду (ЗДА)», одержуючи комплексне кам'яновугільне в'язуче, яке за фізико-механічними властивостями і екологічними характеристиками наблизитиметься до нафтового бітуму.

Використовуючи метод математичного планування експерименту, завданнями дослідження є:

1. Виявлення оптимальної умовної в'язкості кам'яновугільного дьогтю за  $C_{30}^{10}$ , с;
2. Визначення оптимальної масової концентрації полімеру (полівінілхлориду) в кам'яновугільних дьогтях різної в'язкості, %;
3. Визначення оптимальної масової концентрації активного дисперсного наповнювача (кубових залишків очищення дисциляції фталевого ангідриду) в дьогтеполівінілхлоридному в'язучому, %.

### 3. Викладення основного матеріалу досліджень

В даній роботі як об'єкти дослідження було прийнято:

– середовище, що модифікується, – кам'яновугільні дьогті, що складені із середньо-температурного пеку і антраценового масла, які задовольняють вимогам ГОСТ 4641;

– полімер – відходи виробництва полівінілхлориду (відсів – ПВХ) ВАТ «ДніпроАзот» (м. Кам'янське Дніпропетровської області) з молекулярною масою 12·10<sup>4</sup> в.о і частинками розміром менші за (6,3-63)·10<sup>-5</sup> м;

– наповнювач – відходи коксохімічного виробництва – кубові залишки очищення дисциляції фталевого ангідриду (ЗДА) ПАТ «Авдіївський коксохімічний завод» Групи «Метінвест», що являють собою аморфне тіло і утворюються під час очищення фталевого ангідриду (C<sub>8</sub>H<sub>4</sub>O<sub>3</sub>) від домішок хінона в дисциляційних колонах смолоперегонних цехів.

Модифіковане кам'яновугільне в'язуче готували суміщенням кам'яновугільних дьогтів з відсівом полівінілхлориду при температурі 115-125°C впродовж 30 хвилин. Потім додавали порошкоподібні кубові залишки очищення дисциляції фталевого ангідриду і продовжували перемішувати ще 30 хвилин.

Для оптимізації системи «кам'яновугільний дьоготь – полівінілхлорид – кубові залишки очищення дисциляції фталевого ангідриду» було використано композиційний несиметричний план [19] на трьох цілочисельних рівнях (-1; 0; +1) з коефіцієнтом кореляції  $r_{i,j} \leq 0,10$ , де  $i, j = 1, 2, 3$ . Оптимальні склади системи «дьоготь – ПВХ – ЗДА» визначали

як оптимальні області допустимих значень факторів  $X_1, X_2, X_3$  (табл. 1).

Таблиця 1

Система			Фізичний зміст фактору варіювання		
			Умовна в'язкість дьогтю за $C_{30}^{10}$ , с	Масова концентрація ПВХ, %	Масова концентрація ЗДА, %
			$X_1$	$X_2$	$X_3$
Дьоготь – ПВХ – ЗДА	Інтервал варіювання		100	1	20
	Рівні фактора	-1	50	0	0
		0	150	2,5	20
		+1	250	5	40

Ці оптимальні області обмежені поверхнями рівня функції відгуку за кожним з параметрів оптимізації (табл. 2).

Таблиця 2

№ з.п.	Код параметра оптимізації	Фізичний зміст параметра оптимізації	Граничні значення функції відгуку
1	$Y_1$	Оптимальний вміст в'язучого в суміші (в перерахунку на дьоготь), %	Не більше 8,5
2	$Y_2$	Температура розм'якшення в'язучого, °C	Не менше 33
3	$Y_3$	Еластичність в'язучого при 0 °C, %	Не менше 30
4	$Y_4$	Границя міцності дьогтеполівінілхлориду на стиск при 20 °C, МПа	Не менше 2,5
5	$Y_5$	Границя міцності дьогтеполівінілхлориду на стиск при 50 °C, МПа	Не менше 1,0
6	$Y_6$	Границя міцності дьогтеполівінілхлориду на стиск при 0 °C, МПа	Не більше 12,0
7	$Y_7$	Коефіцієнт водостійкості дьогтеполівінілхлориду при тривалому водонасиченні	Не менше 0,8
8	$Y_8$	Відношення напруження зсуву в'язучого до напруження сталої течії	1,1-1,4

Рівняння регресії мають такий вигляд:

$$Y_1 = 7,549 + 0,104 \cdot X_1 + 0,095 \cdot X_2 + 0,100 \cdot X_3 + 0,000 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,053 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,045 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,000 \cdot X_1^2 - 0,114 \cdot X_2^2 + 0,000 \cdot X_3^2;$$

$$Y_2 = 31,271 + 3,115 \cdot X_1 + 4,912 \cdot X_2 + 7,850 \cdot X_3 - 1,497 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,122 \cdot X_1 \cdot X_3 - 2,145 \cdot X_2 \cdot X_3 - 1,575 \cdot X_1^2 - 0,585 \cdot X_2^2 - 2,394 \cdot X_3^2;$$

$$Y_3 = 41,123 - 4,434 \cdot X_1 + 20,209 \cdot X_2 - 10,578 \cdot X_3 - 5,219 \cdot X_1 \cdot X_2 - 3,090 \cdot X_1 \cdot X_3 - 10,662 \cdot X_2 \cdot X_3 - 1,145 \cdot X_1^2 - 19,930 \cdot X_2^2 - 0,055 \cdot X_3^2;$$

$$Y_4 = 4,152 + 0,562 \cdot X_1 + 0,899 \cdot X_2 + 1,835 \cdot X_3 + 0,047 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,408 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,377 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,318 \cdot X_1^2 - 0,134 \cdot X_2^2 + 0,094 \cdot X_3^2;$$

$$Y_5 = 1,083 + 0,118 \cdot X_1 + 0,262 \cdot X_2 + 0,025 \cdot X_3 + 0,123 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,004 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,078 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,076 \cdot X_1^2 + 0,015 \cdot X_2^2 + 0,099 \cdot X_3^2;$$

$$Y_6 = 8,983 + 0,881 \cdot X_1 + 1,383 \cdot X_2 + 2,893 \cdot X_3 - 0,135 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,026 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,014 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,656 \cdot X_1^2 + 0,150 \cdot X_2^2 - 0,531 \cdot X_3^2;$$

$$Y_7 = 0,882 + 0,044 \cdot X_1 + 0,103 \cdot X_2 + 0,088 \cdot X_3 + 0,014 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,010 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,003 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,042 \cdot X_1^2 - 0,038 \cdot X_2^2 - 0,021 \cdot X_3^2;$$

$$Y_8 = 1,068 + 0,118 \cdot X_1 + 0,155 \cdot X_2 + 0,233 \cdot X_3 + 0,117 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,116 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,139 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,000 \cdot X_1^2 + 0,000 \cdot X_2^2 + 0,201 \cdot X_3^2.$$

Зображення поверхонь відгуку параметрів оптимізації ( $Y_1 - Y_8$ ) виконували згідно з методикою, викладеною в роботі [18]. У графічному редакторі системи Maple зазначені поверхні зображені у тривимірному просторі як четвертий вимір.

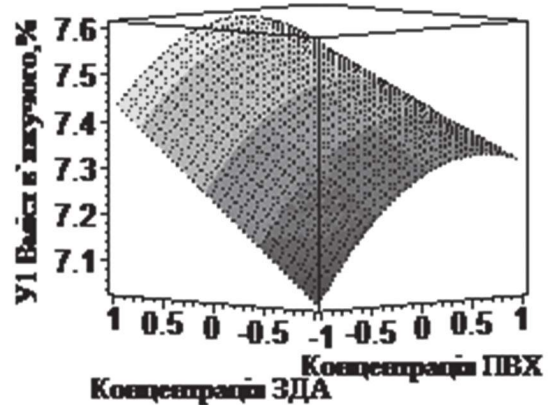
За внесеними до комп'ютерної програми коефіцієнтами рівнянь регресії було визначено кожний параметр оптимізації ( $Y_1 - Y_8$ ). Фіксуючи значення одного з трьох факторів варіювання  $X_i$  та надаючи двом іншим факторам дискретних значень від -1 до +1 з однаковим інтервалом, було обчислено значення варійованих факторів у цих фіксованих точках і побудовано поверхні функцій відгуку. У точках варійованого простору від -1 до +1, в яких фактори варіювання дорівнюють нулю, значення параметра оптимізації ( $Y_1 - Y_8$ ) дорівнює значенню вільного коефіцієнта рівняння регресії  $b_{0i}$ .

Спочатку, за допомогою основної команди `plot3d(G(x, y), x=a..b, y=c..d, options_3d)` [18], де  $G(x, y)$  – функція поверхні;  $a$  і  $b$  – границі зміни змінної  $x$ ;  $c$  і  $d$  – границі змінної  $y$ , які можуть залежати від  $x$ ; `options_3d` – різні опції, було побудовано кожну тривимірну поверхню окремо (рис. 1). А потім, за допомогою команди `plot3d({fun1(x, y), fun2(x, y), ...}, x=a..b, y=c..d, options)` [18], де  $fun1(x, y)$ ,  $fun2(x, y)$  – функції, що визначають поверхні, було побудовано 8 поверхонь (8 параметрів оптимізації) на одному графіку (рис. 2).

Враховуючи те, що в даній роботі  $X_1$  – це умовна в'язкість дьогтю, яка змінюється від  $C_{30}^{10} = 50$  с (при  $X_1 = -1$ ) до  $C_{30}^{10} = 250$  с (при  $X_1 = +1$ ) (табл. 1), а також граничні значення функцій відгуку  $Y_1 - Y_8$  (табл. 2), то, послідовно фіксуючи  $X_1 = -1$ ,  $X_1 = 0$  та  $X_1 = +1$ , графічно можна визначити масову концентрацію полівінілхлориду ПВХ ( $X_2$ ) та масову концентрацію кубових залишків очищення дисциляції фталевого ангідриду ЗДА ( $X_3$ ) відповідно (табл. 1).

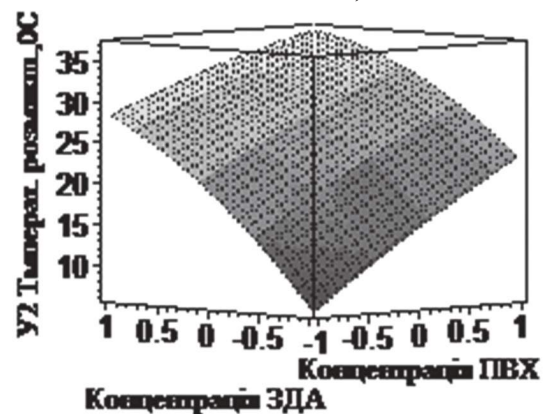
Найхарактернішими поверхнями функцій відгуку є поверхні для параметрів оптимізації  $Y_1$  (оптимальний вміст в'язучого в суміші, %) (рис. 1, а),  $Y_2$  (температура розм'якшення в'язучого, °C) (рис. 1, б) та  $Y_3$  (еластичність в'язучого, %) (рис. 1, в).

В'язкість дьогтю,  $X_1 = -1$



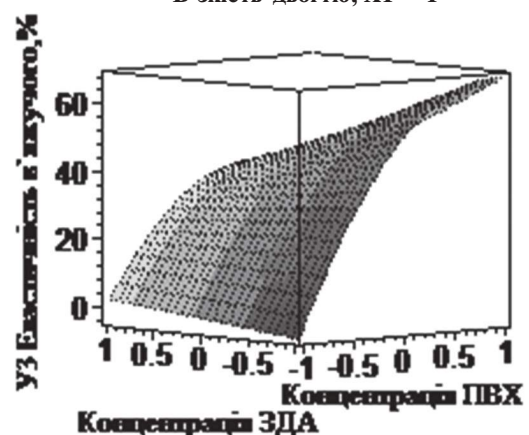
а

В'язкість дьогтю,  $X_1 = -1$



б

В'язкість дьогтю,  $X_1 = -1$



в

Рис. 1. Залежність функцій відгуку:

- $Y_1$  (оптимального вмісту в'язучого в суміші) – а);
- $Y_2$  (температури розм'якшення в'язучого) – б);
- $Y_3$  (еластичності в'язучого) – в) від  $X_2$  (масової концентрації ПВХ) та  $X_3$  (масової концентрації ЗДА) при  $X_1 = -1$  (при умовній в'язкості дьогтю  $C_{30}^{10} = 50$  с)

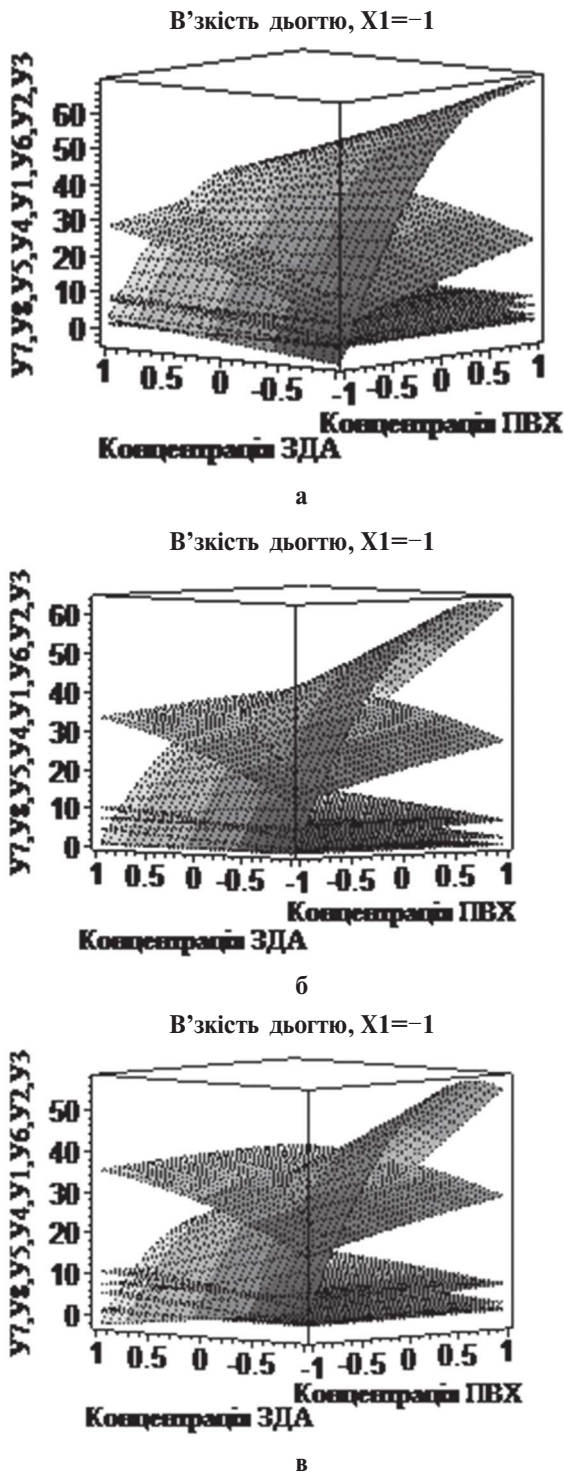


Рис. 2. Залежність параметрів оптимізації ( $Y_1 - Y_3$ ) від  $X_2$  (масової концентрації ПВХ) та  $X_3$  (масової концентрації ЗДА) при  $X_1 = -1, X_1 = 0, X_1 = +1$  (при умовній в'язкості дьогтю  $C_{30}^{10} = 50$  с – а);  $C_{30}^{10} = 150$  с – б);  $C_{30}^{10} = 250$  с – в) відповідно

Послідовність зазначених на рис. 2 функцій відгуку зверху донизу відповідає розташуванню поверхонь параметрів оптимізації (теж зверху донизу).

Допустимі (оптимальні) значення масових концентрацій ПВХ та ЗДА при  $X_1 = -1$  (при умовній

в'язкості дьогтю  $C_{30}^{10} = 50$  с – рис. 2, а);  $X_1 = 0$  (при умовній в'язкості дьогтю  $C_{30}^{10} = 150$  с – рис. 2, б);  $X_1 = +1$  (при умовній в'язкості дьогтю  $C_{30}^{10} = 250$  с – рис. 2, в) (табл. 3) визначали таким чином:

- проводили горизонтальні площини на тривимірних діаграмах (рис. 2) на рівні граничних значень функцій відгуку для відповідного параметра оптимізації (табл. 2);

- опускали перпендикуляри з ліній їхніх перетинів горизонтальних площин з поверхнями функцій відгуку на площину « $X_2 - X_3$ »;

- враховували спрямованість значень кожного параметра оптимізації від його граничного значення («більше», «менше») (табл. 2);

- розв'язували числові нерівності методом інтервалів (табл. 3).

Аналізуючи дані табл. 3, спостерігаємо чітку логічну закономірність: з підвищенням  $X_1$  (умовної в'язкості дьогтю) від  $C_{30}^{10} = 50$  с до  $C_{30}^{10} = 250$  с знижуються масові концентрації ПВХ (від  $1,9\% < X_2 < 2,7\%$  до  $1,6\% < X_2 < 2,2\%$  відповідно) та ЗДА (від  $14\% < X_3 < 22\%$  до  $11\% < X_3 < 17\%$  відповідно) – для функції відгуку  $Y_2$  – температура розм'якшення в'язучого. Аналогічну залежність виявлено і для параметра оптимізації  $Y_3$  (еластичність в'язучого), а саме: зменшення концентрацій від  $1,0\% < X_2 < 2,2\%$  до  $0,7\% < X_2 < 2,0\%$  відповідно для ПВХ та від  $12\% < X_3 < 20\%$  до  $5\% < X_3 < 15\%$  відповідно для ЗДА.

За допомогою метода інтервалів встановлено, що оптимальною системою «кам'яновугільний дьоготь – полівінілхлорид (ПВХ) – кубові залишки очищення дисциляції фталевого ангідриду (ЗДА)» буде за масових концентрацій 1,9-2,0% ПВХ ( $X_2$ ) та 14-15% ЗДА ( $X_3$ ) при умовній в'язкості дьогтю від  $C_{30}^{10} = 50$  с до  $C_{30}^{10} = 250$  с ( $X_1$ ).

#### Висновки та напрямок подальших досліджень

Вперше за допомогою системи комп'ютерної алгебри Maple проведено математичне моделювання системи «кам'яновугільний дьоготь – полівінілхлорид – кубові залишки очищення дисциляції фталевого ангідриду». На підставі розробленої математичної моделі та розрахованих і побудованих у графічному редакторі системи Maple тривимірних поверхонь функцій відгуку «параметр оптимізації – фактори варіювання» доведено, що оптимальними концентраціями відходів виробництва полівінілхлориду в кам'яновугільних дьогтях з умовною в'язкістю дьогтю від  $C_{30}^{10} = 50$  с до  $C_{30}^{10} = 250$  с є 1,9-2,0% та кубових залишків очищення дисциляції фталевого ангідриду 14-15%.

Подальші дослідження будуть присвячені виявленню доцільності застосування оптимальних дегтеполівінілхлоридних в'язучих, наповнених кубовими залишками очищення дисциляції фталевого ангідриду, для зміцнення основ автомобільних доріг з горілих порід шахтних териконів.

Таблиця 3

Область допустимих значень масових концентрацій ПВХ ( $X_2$ ) і ЗДА ( $X_3$ )

Параметр оптимізації	Умовна в'язкість дьогтю за $C_{30}^{10}$ , с ( $X_1$ )					
	50 ( $X_1 = -1$ )		150 ( $X_1 = 0$ )		250 ( $X_1 = +1$ )	
	$X_2$ , %	$X_3$ , %	$X_2$ , %	$X_3$ , %	$X_2$ , %	$X_3$ , %
$Y_1$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$
$Y_2$	$1,9 < \theta < 2,7$	$14 < \theta < 22$	$1,8 < \theta < 2,6$	$18 < \theta < 21$	$1,6 < \theta < 2,2$	$11 < \theta < 17$
$Y_3$	$1,0 < \theta < 2,0$	$12 < \theta < 20$	$0,8 < \theta < 2,0$	$6 < \theta < 18$	$0,7 < \theta < 2,0$	$5 < \theta < 15$
$Y_4$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$
$Y_5$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$
$Y_6$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$
$Y_7$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$
$Y_8$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$	$0 < \theta < 5$	$0 < \theta < 40$

## Список літератури:

1. Колчанов А.Г. Применение полимеров при поверхностной обработке / А.Г. Колчанов // Автомобильные дороги. – 1971. – № 11. – С. 21-22. 2. Гохман, Л.М. Комплексные органические вяжущие материалы на основе блоксополимеров типа СБС / Л. М. Гохман // Учебное пособие. – М.: ЗАО «ЭКОНОМ - ИНФОРМ», 2004. – 510 с. 3. Ansart Rene. Nue Aussichten fur ver wendung von strassen teer / Rene Ansart // Bitum, Teere, Asph., Reche und verwstoff. – 1968. – № 8. – pp. 304-308. 4. Руденская И.М. Опыт применения каменноугольных вяжущих в дорожном строительстве / И.М. Руденская, А.В. Руденский. – М.: ЦБНТИ Минавтодора РСФСР, 1975. – Вып. 5. – 44 с. 5. Володько В.П. Використання відходів виробництва полімерів у дорожньому будівництві / В.П. Володько. – К.: Будівельник, 1987. – 72 с. 6. Руденская И.М. Обзор по важнейшим научным и научно-техническим проблемам, предусмотренным пятилетним планом развития народного хозяйства / И.М. Руденская, А.В. Руденский. – М.: ЦБНТИ Минавтодора РСФСР, 1979. – 70 с. 7. Думанский А.М. Использование отходов производства полистирола для повышения качества дегтей и дегтебетонов / А.М. Думанский, В.М. Даценко, В.П. Володько // Тезисы докладов всесоюзной конференции «Управление структурообразованием, структурой и свойствами дорожных бетонов». – Харьков, ХАДИ, 1983. – С. 91-92. 8. Грушко И.М. Определение составов и технологических режимов приготовления дегтеполимерных вяжущих / И.М. Грушко, В.А. Золотарев, Б.А. Лишанский и др. // Известия вузов. – Новосибирск, 1982. – № 6. – С.67-70. 9. Рафалес-Лемарка Э.Э. Некоторые методы планирования и математического анализа биологических экспериментов / Э.Э. Рафалес-Лемарка, В.Г. Николаев. – К.: Наукова думка, 1971. – 119 с. 10. Белкин И.М. Ротационные приборы. Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов / И.М. Белкин, Г.В. Виноградов, Л.М. Леонов. – М.: Машино-

строение, 1967. – 272 с. 11. Братчун В.И. Об особенностях структурообразования в дегтеполивинилхлоридных вяжущих / В.И. Братчун, А.И. Повзун, М.К. Пактер и др. // Автошляховик України. – 1997. – №3. – С. 34-35. 12. Повзун О.І. Оптимальне кам'яновугільне в'язуче, модифіковане відходами виробництва полістиролу, для укріплення горілопородних основ автомобільних доріг / О.І. Повзун, С.В. Подкопаєв, О.В. Фролов та ін. // Гірничий вісник. – Кривий Ріг, 2016. – Вип. 101. – С. 111-118. 13. 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. 14. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В. Кафаров. – М.: Химия, 1971. – 496 с. 15. Налимов В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 30 с. 16. Повзун О.І. Використання відходів вугільної та хімічної промисловості в основах автомобільних доріг / О.І. Повзун, С.В. Подкопаєв, О.В. Фролов та ін. // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ. – 2015. – № 48. – С. 234-243. 17. Повзун О.І. Математичне моделювання трикомпонентної технологічної системи наповненого дьогтеполімерного в'язучого / О.І. Повзун, С.О. Вірич, С.В. Кононихін та ін. // Бионика интеллекта. – Харьков, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. – 2016. – № 1 (86). – С. 26-32. 18. Дзундза А.И. Программное обеспечение ЭВМ. MAPLE. Учебное издание для студентов специальности «Прикладная математика» / А.И. Дзундза, М. Д. Гремалюк, И. А. Моисеенко и др. – Донецк, ДонНУ. – 2005. – 190 с. 19. Бродский В.Э. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей / В.Э. Бродский. – М.: Металлургия, 1982. – 752 с.

Надійшла до редколегії 11.05.2018

УДК 519.62:532.5:681.516.75

А.П. Сафоник<sup>1</sup>, І.М. Таргоній<sup>2</sup>, С.А. Коваль<sup>3</sup><sup>1</sup>НУВГП, м. Рівне, Україна, safonik@ukr.net;<sup>2</sup>НУВГП, м. Рівне, Україна, targoniy93@ukr.net;<sup>3</sup>НУВГП, м. Рівне, Україна, sergiy44607@gmail.com;

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОКОАГУЛЯЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД

Побудовано математичну модель процесу електрокоагуляційного очищення стічних вод, що враховує геометричні розміри реактора, об'ємну витрату рідини та прикладену силу струму. Розроблено імітаційну модель, яка описує процеси, що протікають в електрокоагуляторі, на основі якої проведено дослідження впливу сили струму на концентрацію цільового компоненту на виході з реактора. На основі експериментальних даних перевірено адекватність побудованої моделі. Розроблено систему автоматизації, що забезпечує оптимальну витрату електроенергії при дотриманні екологічних норм, щодо допустимих концентрацій іонів важких металів.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ЕЛЕКТРОКОАГУЛЯЦІЯ, АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ, СТИЧНІ ВОДИ, ЕЛЕКТРОЛІЗЕР

**А.П. Сафоник, І.М. Таргоній, С.А. Коваль. Моделирование и автоматизация процесса электрокоагуляционной очистки сточных вод.** Построена математическая модель процесса электрокоагуляционной очистки сточных вод, которая учитывает геометрические размеры реактора, объемный расход жидкости и прилагаемую силу тока. Разработана имитационная модель, которая описывает процессы, протекающие в реакторе, на ее основе проведено исследование влияния силы тока на концентрацию целевого компонента на выходе из реактора. Проверено точность полученных результатов сравним с данными эксперимента. Разработана система автоматизации, которая обеспечивает оптимальный расход электроэнергии при соблюдении экологических норм, относительно допустимых концентраций ионов тяжелых металлов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИЯ, АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ, СТОЧНЫЕ ВОДЫ, ЭЛЕКТРОЛИЗЕР

**A.P. Safonik, I.M. Targoniy, S.A. Koval. Simulation and automation of the electrocoagulation process for wastewater treatment.** Mathematical model of the electrocoagulation process for water treatment, which takes into account the geometric dimensions of the reactor, the volumetric flow rate and the applied current strength, was constructed. The simulation model that describes the processes occurring in the electrocoagulator has been developed, on the basis of this studied the influence of current strength on the concentration of the target component at the exit from the reactor. Based on experimental data verified the adequacy of the constructed model. A system of automation, which provides the optimal energy consumption and ensures observance of ecological standards for allowable concentrations of heavy metal ions, has been developed.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИЯ, АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ, СТОЧНЫЕ ВОДЫ, ЭЛЕКТРОЛИЗЕР

### Вступ

В останні роки, незважаючи на зниження темпів розвитку промисловості, суттєво загострилися проблеми із забрудненням води. Одним з шляхів забруднення є використання у виробництві хімічних методів, які дуже поширені в технологічних процесах. Проте результати хімічної обробки завжди залишаються відходи, що мають негативний вплив на довкілля. Часто для очищення таких стічних вод використовують системи, які вже давно відпрацювали свій ресурс. Час напрацювання на відмову таких систем давно вийшов і використання зношених систем не забезпечує необхідних концентрацій допустимих домішок. Перевищення допустимих концентрацій забруднення у навколишньому середовищі несе негативний вплив природним екосистемам. Тому розроблення сучасних систем водоочищення є одним з першочергових завдань для збереження довкілля.

Одним з найбільш прогресивних напрямів в технології водоочищення є метод електрокоагуляції. До переваг якого відносять: висока продуктивність, мала чутливість до зміни складу сумішей, відсутність необхідності попереднього видалення розчинених органічних речовин, наявність промислового випуску різних електрокоагуляційних установок, відсутність необхідності додаткового введення коагулянтів. Проте в даних системах є і ряд недоліків, серед яких основні: утворення великої кількості шлам, велика витрата металу анода і електроенергії [1].

### 1. Постановка задачі

Для дослідження використаємо модельну задачу процесу очищення стічних вод від забруднення запропонованому в [3]. Особливостями такої постановки проблеми є те, що в системі рівнянь (1) враховано процеси, що проходять в реакторі, як сукупність взаємодії різних факторів в залежності

від: концентрації завислих речовин у воді, прикладеної сили струму, швидкості потоку та температур рідини, зовнішнього середовища, води в реакторі, конструктивних параметрів коагулятора:

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = \frac{L}{V}(C_{in} - C) - (a_0 + a_1T + a_2C + a_3I); \\ \tau \frac{dT}{dt} = \frac{(a_0 + a_1T + a_2C + a_3I)VH}{KS} - (T - T_z) - \\ - \frac{c\rho L(T - T_{in})}{KS}, \end{cases} \quad (1)$$

$$C(0) = C_0, T(0) = T_0. \quad (2)$$

де  $C$  – концентрація цільового компонента у воді;  $C_{in}$  – концентрація забруднення на вході в електролізер;  $T$  – температура води в реакторі;  $T_z$  – температура зовнішнього середовища;  $T_{in}$  – температура вхідної рідини;  $I$  – сила струму;  $a_0 \dots a_3$  – емпіричні коефіцієнти;  $S$  – площа поверхні робочої зони апарата;  $L$  – об’ємні витрати рідини;  $V$  – об’єм робочої зони електролізера;  $c$  – питома теплоємність рідини;  $\rho$  – густина води;  $K$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $H$  – тепловий ефект процесу (реакції електрокоагуляції);  $\tau$  – стала часу;  $T$  – час.

## 2. Огляд літератури

Ряд авторів [1-5] займаються дослідженням процесу очищення стічних вод методом електрокоагуляції. При проведенні електрокоагуляційних експериментів виникають проблеми [5] при:

– виборі оптимальних режимів роботи електрокоагулятора в зв’язку з тим, що на рідину діють електромагнітні сили, хімічні процеси в самій рідині і фізико-хімічні процеси в приелектродному просторі;

– врахуванні основних параметрів процесу, оскільки вплив на процес електрокоагуляції здійснюють тип струму (постійний, змінний чи реверсивний), величина прикладеної напруги, матеріал електродів, форма електродів (плоскі, трубчасті, коробчасті, пластинчасті), відстань між електродами, чистота поверхності електродів, а також гідравлічні і термодинамічні процеси і їх зміна в часі.

В основному для опису процесів, що протікають в реакторі використовують математичні моделі, що враховують лише частину параметрів електрокоагуляції. Авторами [3] запропоновано математичну модель електролізера, яка враховує ряд важливих параметрів, якими можна впливати на швидкість і якість протікання процесу електрокоагуляції. Проте для повноти отримання інформації необхідно дослідити вплив на концентрацію завислих речовин зміну густини струму, що є основним керуючим параметром. В роботі [5] процес електрокоагуляції розглядається з точки зору

експериментів; досліджено зміну концентрації забруднення при різних значеннях густини струму, витрати рідини, кислотності середовища. Проте виведена математична модель описує лише реактор даних геометричних розмірів з зміною основних збурень в заданих межах і не враховує вплив зміни температури води на якість очищення.

Враховуючи вище сказане, метою даної роботи:

1) розробити модель процесу електрокоагуляційної очистки стічних вод, яка враховує процеси, що протікають в середині реактора та дає можливість змінювати керуючі впливи, такі як: величина сили струму, швидкість потоку рідини, геометричні розміри реактора та вхідна концентрація завислих речовин;

2) провести імітаційне моделювання та отримати розв’язок відповідної модельної задачі з використанням додатку Simulink середовища MatLab;

3) перевірити точність отриманих результатів шляхом порівняння з експериментальними даними;

4) дослідити вплив величини сили струму на якість очищення стічних вод при змінній вхідній концентрації забруднення;

5) розробити систему автоматизації, яка мінімізує витрати електроенергії на очищення стічних вод при дотриманні встановлених екологічних норм концентрацій забруднень.

## 3. Матеріали і методи

Для моделювання роботи системи рівнянь (1)-(2) використаємо додаток Simulink програмного середовища Matlab, який дає можливість будувати графічні блок-діаграми, імітувати динамічні системи, досліджувати працездатність систем і вдосконалювати проекти [6].

Для знаходження розв’язку системи використано додаток Simulink програмного пакету Matlab в якому розроблено імітаційну модель об’єкта (рис. 1, а). До вхідних параметрів даної моделі відносяться: концентрація забруднення на вході в електролізер, об’ємна витрата рідини, об’єм робочої зони реактора, прикладена сила струму, тепловий ефект реакції електрокоагуляції, коефіцієнт тепловіддачі коагулятора, площа поверхні робочої зони апарата, температури зовнішнього середовища та вхідної рідини, стала часу нагрівання, питома теплоємність та густина рідини, а вихідним параметром буде концентрація забруднення цільового компонента на виході з реактора.

Для дослідження впливу зміни величини струму на якість очищення стічних вод розроблено імітаційну модель (рис. 1, б), яка складається з 3 реакторів в яких всі вхідні дані є спільними крім густини струму. Для наочності концентрації забруднення

при різній величині сили струму відображаються в одній координатній площині.

Для підтвердити адекватність моделі використовуємо експериментальні дані з [5], що представлені в табл. 1 та отримані дані моделювання відповідно до параметрів при яких проводили експерименти. Використавши стандартні засоби побудови графіків Matlab розмістимо результати моделювання з даними експерименту за однакових вихідних даних і порівняємо.

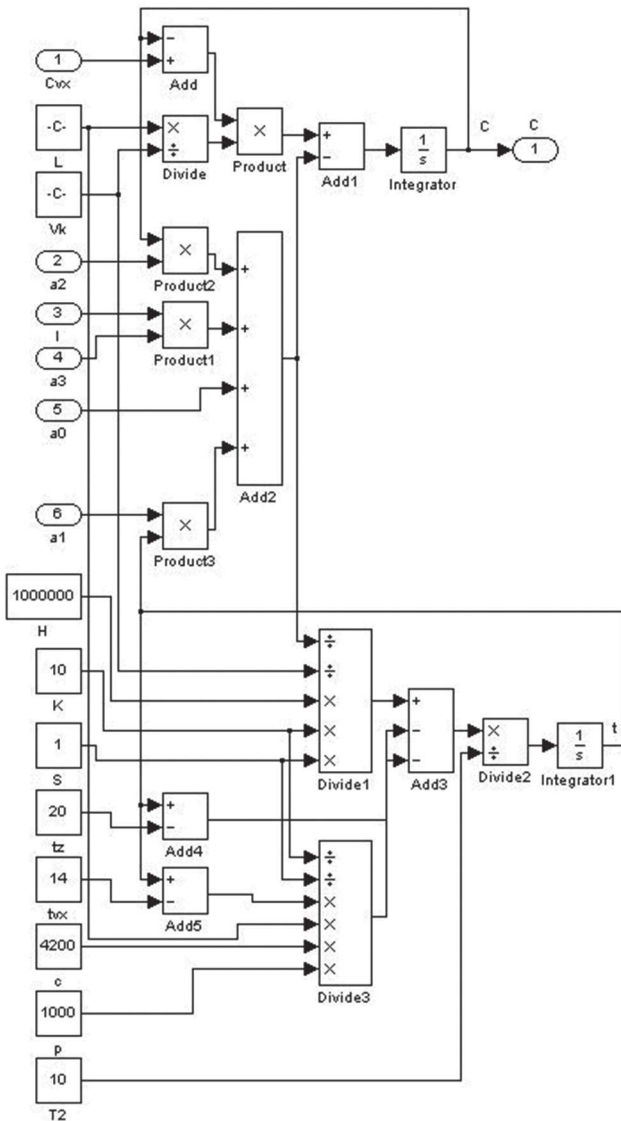
Підтвердивши адекватність моделі та провівши дослідження впливу сили струму на вихідну концентрацію забруднення виникли передумови для розробки системи автоматизації.

В основі енергоефективного керування виробництвом лежать принципи автоматизованого керування. Вихідні дані з таблиці дозволяють розробити П-регулятор для електрокоагулятора запропонованих режимів роботи Оскільки наша

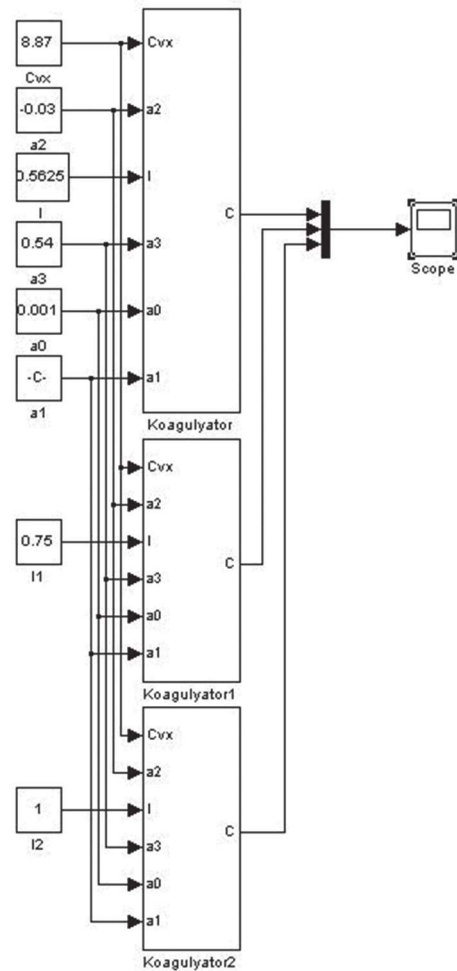
Таблиця 1

**Вихідні дані експерименту**

Час, хв	Густина струму $i$ , А/м <sup>2</sup>		
	9	12	16
	Сила струму модельного електролізера, А		
	0,5625	0,75	1
Концентрація іонів нікелю, мг/л			
0	8,87	8,87	8,87
5	6,23	5,9	5,24
10	4,22	5,4	4,71
15	3,84	5,33	4,67
20	3,29	3,81	4,64
25	3,06	3,69	3,27
30	2,81	3,43	3,1
35	2,67	3,17	3,03



а



б

Рис. 1. Simulink модель роботи електрокоагулятора (а) та Simulink модель дослідження впливу сили струму на концентрацію забруднення цільового компонента на виході з реактора (б)



система має дуже низьку інерційність по каналу регулювання і відсутні збурення які змінювали б концентрацію іонів нікелю після вимірювання датчик в системі не є доцільним використовувати ПІ або ПІД регулятор, що ускладнить розробку системи, тому достатньо П-регулятора. Щоб отримати налаштування під нашу систему ми з допомогою програми Matlab провели апроксимацію даних з табл. 2 для отримання коефіцієнтів поліноміального ряду. При цьому використовували функцію polyfit:

```
>> C=[8.87 4 5 6 7 8 10 15 20 30];
>> I=[0.75 0.132 0.258 0.385 0.511 0.638 0.891 1.524
2.155 3.421];
>> polyfit(C,I,1)
ans = 0.1265 -0.3738
```

В результаті отримали залежність зміни сили струму від вхідної концентрації іонів нікелю, що представлено рівнянням 3 та виступає в системі як П-регулятор.

$$I = 0,1265 * C_{in} - 0,3738 \quad (3)$$

При підборі приладів для апаратної реалізації системи перевага надавалася приладам, засобам автоматики та обчислюваної техніки серійного виробництва провідних фірм, таких як Schneider Electric, Siemens, Omron та інші. На вибір впливали такі параметри контрольованого середовища (тиск, витрата, температура, механічні впливи, умови середовища контролю та вимірювання), характер і розміри контрольованого об'єкта, продуктивність установки, умови охорони праці. Також враховувалися такі вимоги до засобів автоматизації, як точність, чутливість, інерційність. Уніфікована апаратура полегшить експлуатацію системи.

На основі отриманих даних розроблено функціональну схему автоматизації процесу очищення стічних вод методом електрокоагуляції, яка представлена на рис. 6. Всі функції регулювання та контролю основних параметрів у проектованій системі автоматизації виконує програмований логічний контролер S-7 300 підприємства "Siemens" з модулями розширення, аналогових входів SM331, аналогових виходів SM332 та дискретних входів/виходів SM323, який при даній конфігурації має 2 аналогові входи, 2 аналогові виходи, 8 дискретних входів і 8 дискретних виходів, яких достатньо для керування даною системою.

Для забезпечення допустимої концентрації домішок у стічних водах використовується система, до складу якої входять електрокоагулятор, пісколовка, первинний відстійник, первинний освітлювач, аераційний басейн, 3 давача рівня осаду, датчик концентрації шестивалентного хрому у воді, програмованого логічного контролера S7-300,

3 регулюючі клапани, частотно керований компресор.

Дана система має 4 контури регулювання, які забезпечують на відповідному рівні такі технологічні параметри:

- 1) Концентрація іонів нікелю на виході з електрокоагулятора.
- 2) Рівень важких мінеральних домішок(піску) в пісколовці.
- 3) Рівень осаду в відстійнику.
- 4) Рівень осаду в електрокоагуляторі.

Для реалізації даного проекту використовуючи Simatic Step7 написано програму керування процесом, попередньо налаштувавши апаратне забезпечення контролера та створено символну таблицю, в якій описані всі входи, виходи, мітки з їх символними, апаратними іменами та коментарями.

В розробленій системі програма керування роботою системою очищення стічних вод від домішок написана на мові драбинкових діаграм (Ladder Language – LD).

Для забезпечення допустимої концентрації іонів нікелю в стічних водах використовується система до якої входять аналізатор з аналоговим вихідним сигналом, контролер, випрямляч, який керує величиною поданої напруги на електрокоагулятор. Сигнал з уніфікованого давача надходить до контролера, де обробляється відповідно до меж вимірювання концентратоміра в OB1 network1. Отримане реальне значення вмісту концентрації іонів нікелю у воді тримається за адресою MD14, яке в наступному блоці програми обробляється відповідно до отриманої залежності зміни допустимої концентрації домішок від вхідної концентрації. Спочатку реальне значення на вході в електрокоагулятор масштабується і додається коефіцієнт зміщення і таким чином визначається оптимальне значення прикладеної напруги, що мінімізує витрати електроенергії, але подається на аналоговий вихід контролер через час T1 за який вода надійде від входу електрокоагулятора до робочої зони. Отриманий сигнал з контролера надходить на регулятор, який підсилює сигнал і керує величиною прикладеної напруги, що визначає концентрацію іонів нікелю. Саме такий алгоритм керування реалізовано в контролері і представлено на рис. 7. Для моніторингу роботи системи в реальному часі розроблено вікно візуалізації в середовищі WinCCFlexible, що показано на рис. 8, яке дає можливість оператору в реальному часі слідкувати за роботою очисних споруд. Також системою передбачено автоматичний і ручний режим роботи для якісного догляду за встановленим обладнанням і можливістю віддаленого керування системою.

**4. Експерименти**

На основі розробленої моделі рис. 1 проведено дослідження впливу величину сили струму на концентрацію іонів нікелю. В якості вихідних даних використовували ДСТУ згідно з яким концентрація іонів нікелю у стічних водах не повинна перевищувати 3,2 мг/л, але в зв'язку з інерційністю регулятора та системи в якості допустимої концентрації домішок використаємо завдання 3,0 мг/л. Також для моделювання використовували експериментальні дані з табл. 1 згідно з якими за 35 хв система повинна забезпечувати допустиму концентрацію домішок. Отже при моделюванні керувалися наступним принципом: за 35 хвилин система має очистити концентрацію іонів нікелю до 3,0 мг/л. При зміні концентрації забруднення на вході отримували значення сили струму, яку необхідно прикласти, а результати наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Залежність сили струму від вхідної концентрації іонів нікелю для оптимального керування

№	Концентрація іонів нікелю, мг/л	Сила струму, А
1	8,87	0,75
2	4	0,132
3	5	0,258
4	6	0,385
5	7	0,511
6	8	0,638
7	10	0,891
8	15	1,524
9	20	2,155

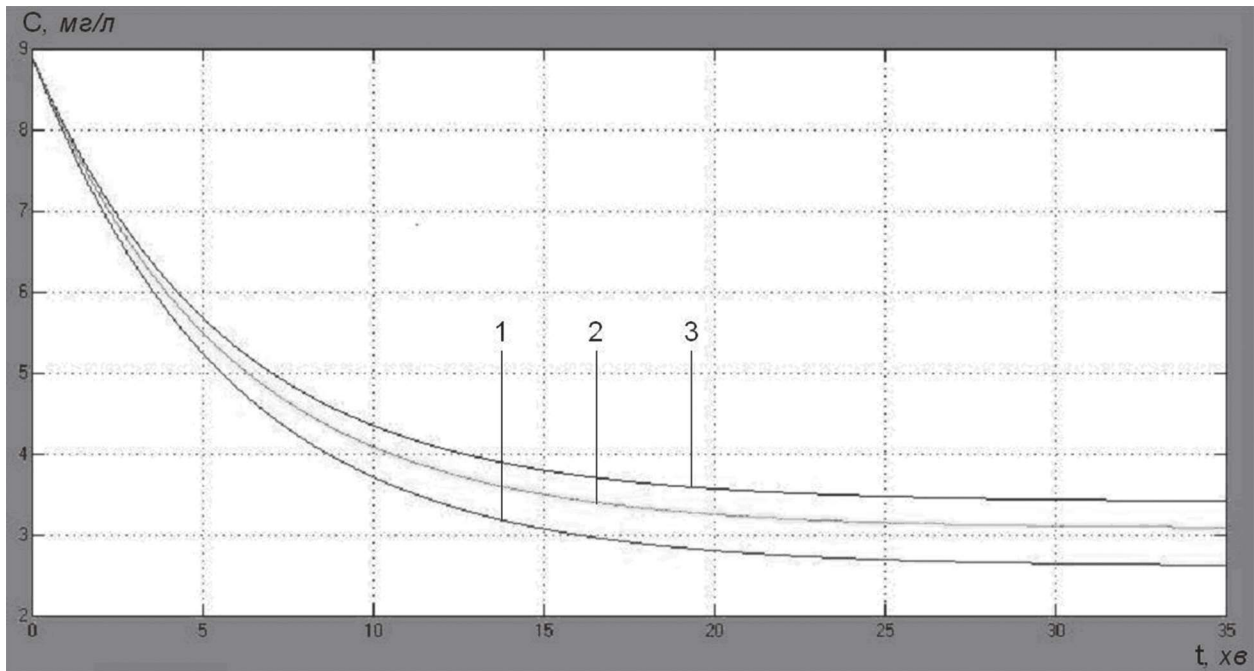


Рис. 2. Зміна концентрації забруднення іонами нікелю на виході з коагулятора з часом при силі струму  $I = 0,5625 \text{ A}$  — крива 3,  $I_1 = 0,75 \text{ A}$  — крива 2,  $I_2 = 1 \text{ A}$  — крива 1

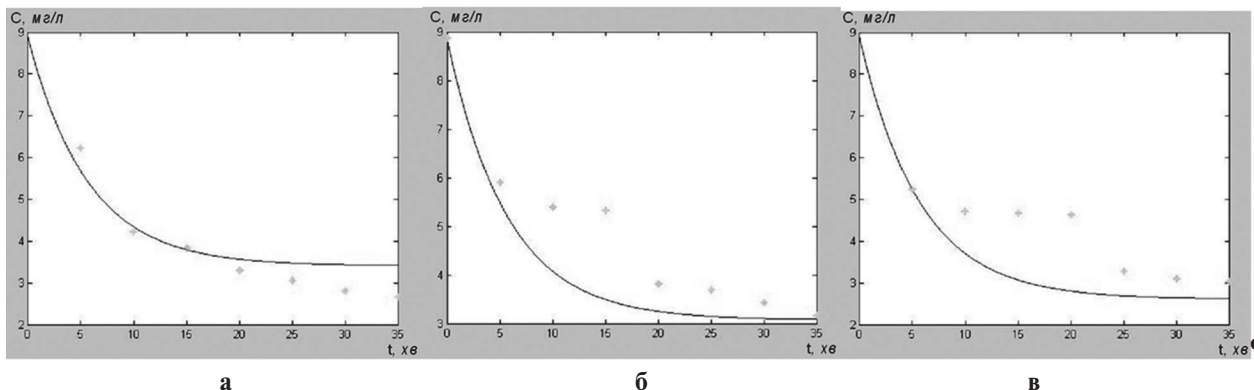


Рис. 3. Зміна концентрації забруднення від часу при густині струму  $I = 9 \text{ A/m}^2$  — а,  $I = 12 \text{ A/m}^2$  — б та  $I = 16 \text{ A/m}^2$  — в

### 5. Результати

Шляхом комп'ютерного моделювання за наведеними вхідними даними:  $C_{in}|_{t=0} = 8,87 \text{ мг/л}$ ,  $T|_{t=0} = 18^\circ\text{C}$ ,  $L = 0,006 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $V = 0,03125 \text{ м}^3$ ,  $H = 1 \text{ МДж/г}\cdot\text{с}$ ,  $K = 10 \text{ Вт/м}^2\cdot^\circ\text{C}$ ,  $S = 1 \text{ м}^2$ ,  $T_z = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_{in} = 14^\circ\text{C}$ ,  $c = 4200 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $\tau = 10$ ,  $a_0 = 0,001$ ,  $a_1 = 0,000007$ ,  $a_2 = -0,03$ ,  $a_3 = 0,54$  — отримали такі результати (рис. 2). Використавши експериментальні дані з табл. 1 та результати моделювання системи при різній величині струму з допомогою стандартних засобів Matlab побудували отримані результати на сітці дослідних даних (рис. 3) для наочності відображення точності моделі. Для перевірки роботи регулятора розроблено

імітаційну модель, що представлена на рис. 4, яка складається з двох субсистем “Regulator” рис. 4 б, “Coagulator” рис. 4а.

В підсистемі “Regulator” реалізовано залежність 3, яка оптимізує силу струму, що протікає між катодом і анодом та дозволяє економити витрати електроенергії. Проте в реальних системах струм не міняється миттєво, а інерційно, тому додатково введено передавальну функцію, яка описує інерційність системи.

Після проведення моделювання отримано результати, які представлено на рис. 5, де в якості вхідної концентрації забруднення використано випадковий сигнал, що формується блоком “Random number” (рис. 5 а).

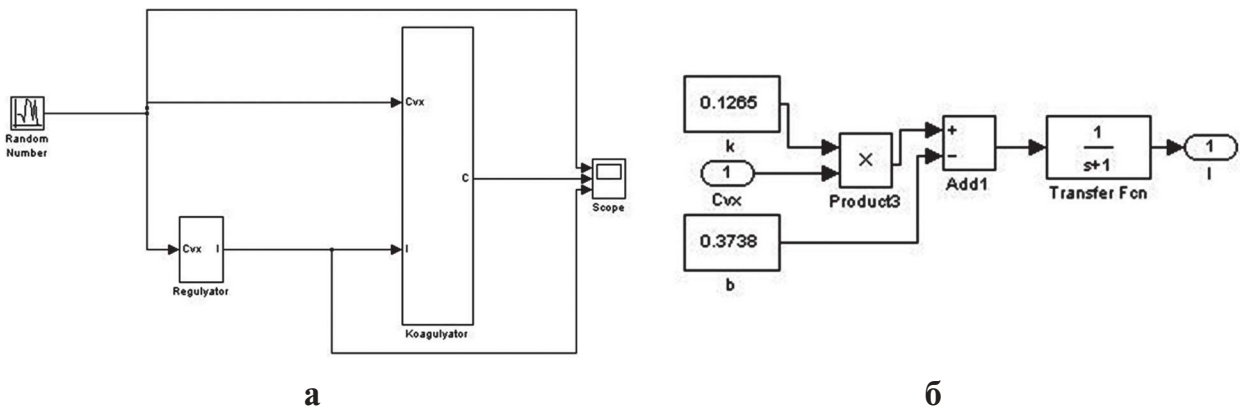


Рис. 4. Імітаційна модель для перевірки роботи системи а) та імітаційна модель регулятора б)

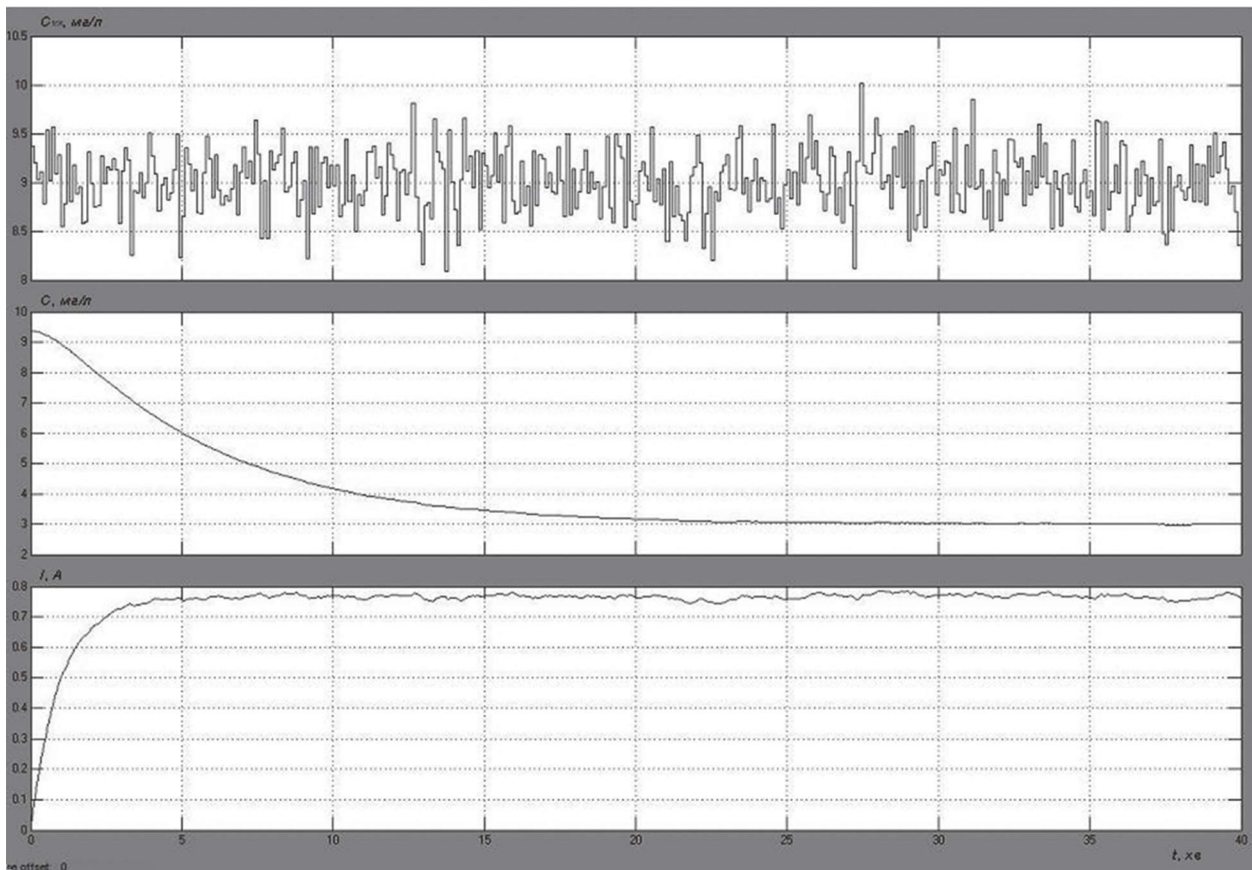


Рис. 5. Зміна вхідної концентрації, концентрації забруднення та сили струму при роботі П-регулятора

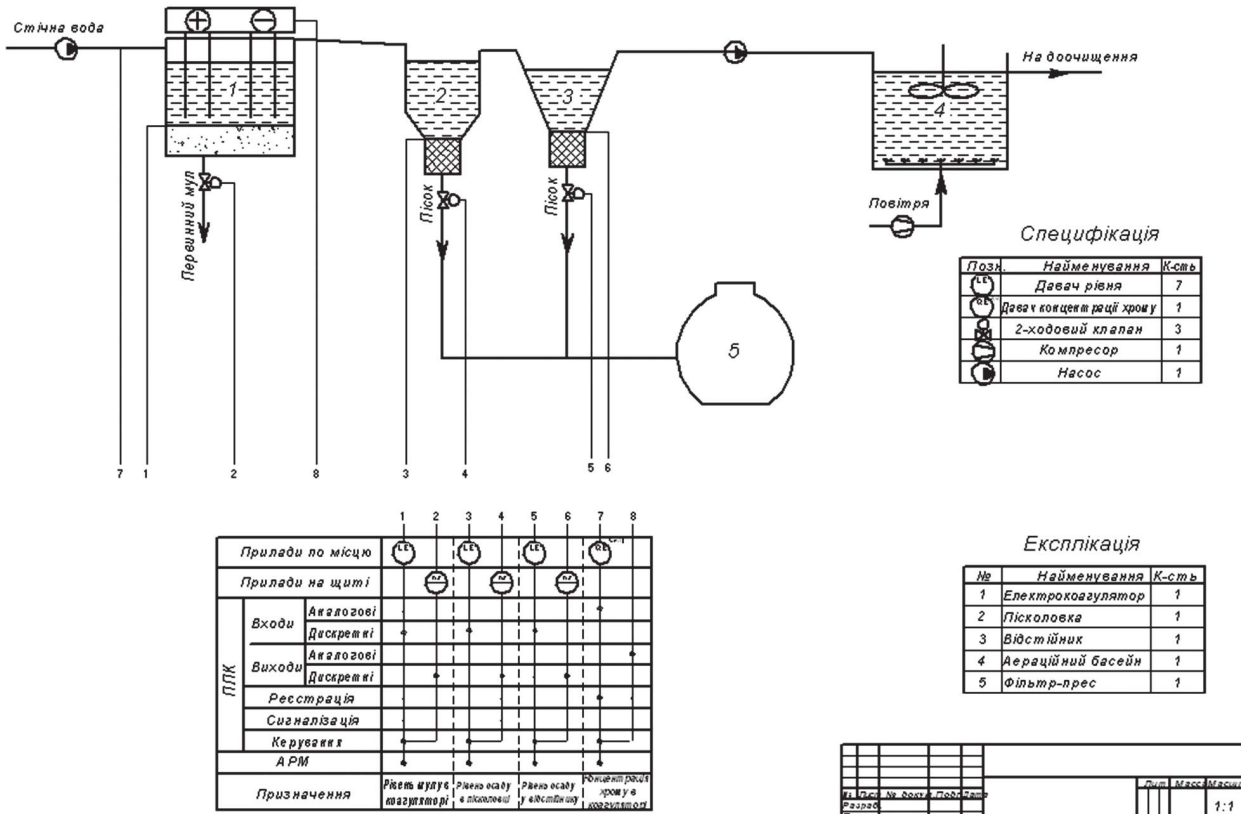


Рис. 6. Функціональна схема автоматизації роботи електрокоагулятора

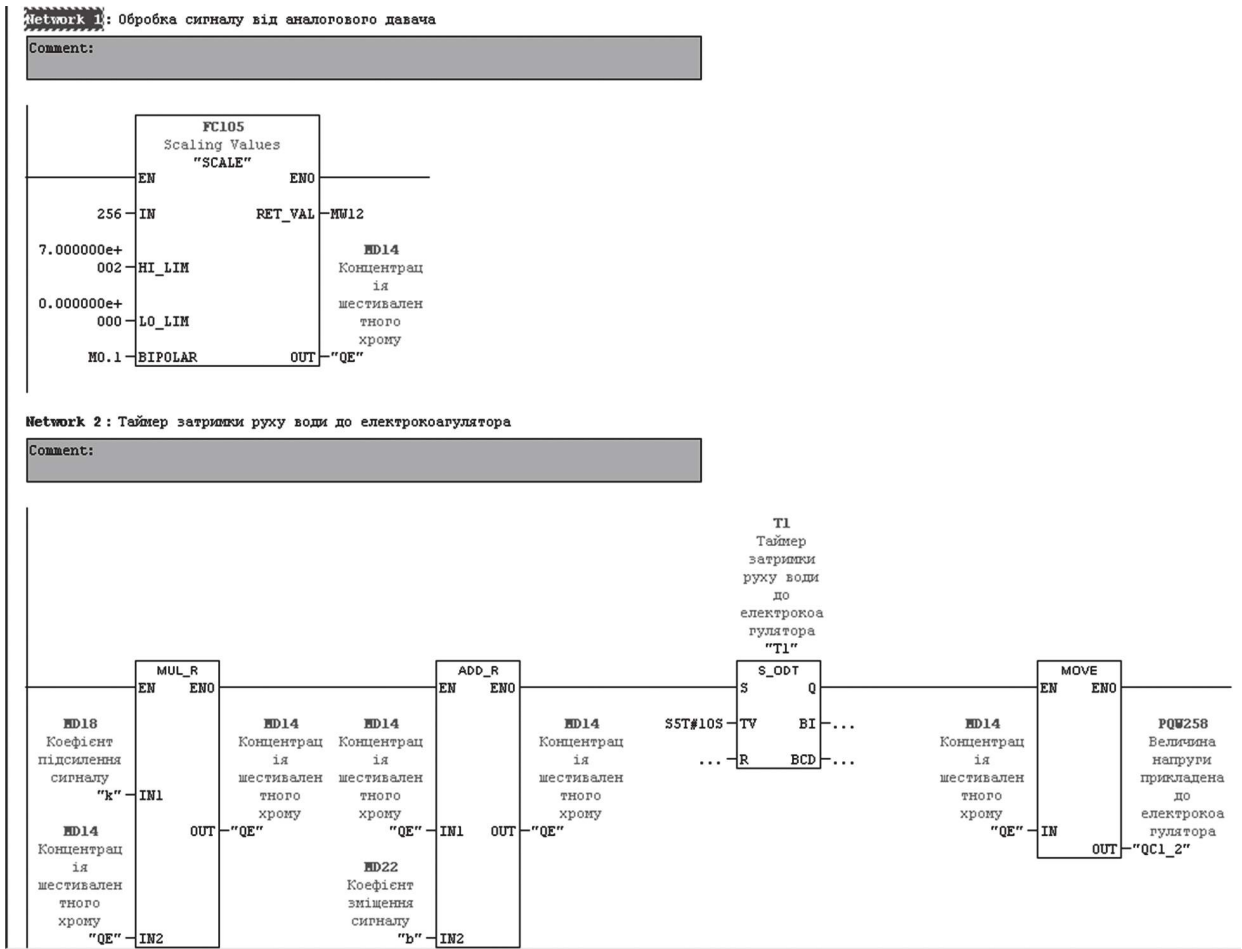


Рис. 7. Підпрограма для забезпечення допустимої концентрації іонів нікелю.

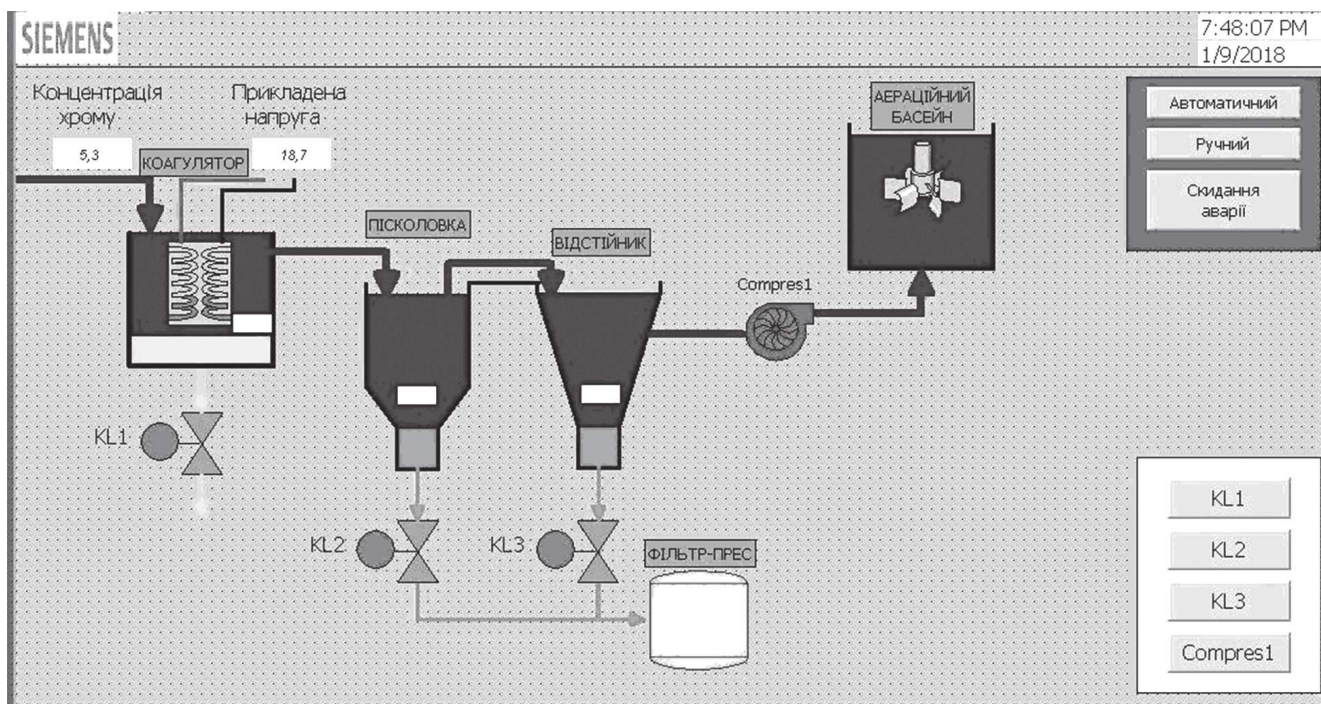


Рис. 8. Мнемосхема процесу для керування роботою електрокоагулятора

При проведенні експериментів за основу бралися дані, що вхідна концентрація змінюється в межах 8-10 мг/л, а на виході повинна бути згідно екологічних норм не більше 3,5 мг/л. Згідно технологічних вимог витрата коагулянту має бути 25 л/год. Щоб забезпечити задані умови при розмірах реактора згідно з експериментальними даними необхідно підтримувати силу струму на випрямлячі 0,9 А при 24 В постійного струму з використанням лінійного регулятора, що відповідає 8,25 А джерелу живлення 220 В змінного струму по якому і відбувається оплата за електроенергію. За добу роботи даного електрокоагулятора без системи автоматизації лише на випрямляч буде використовуватися 44,9 кВт \* год електроенергії.

Згідно результатів моделювання при використанні запропонованої системи автоматизації з П-регулятором сила струму між електродами в середньому дорівнюватиме 0,7289 А. В колі джерела живлення відповідно буде 6,68 А. Таким чином за добу витрати електроенергії, які споживатиме випрямляч дорівнюватимуть 35,3 кВт \* год. Отже запропонована система автоматизації, що представлена на рис. 6-8 дозволить зекономити до 21,4% витрат на електроенергію. З врахуванням того, що експериментальна установка підтримує силу струму не більше 1 А, а в промислових системах струм між електродами рівний порядку 80 А застосування даної системи дозволить дотримуватися екологічних стандартів із значною економією коштів при оплаті рахунків за електроенергію.

## 6. Обговорення

На рис. 2 показано, що в початковий момент часу на всіх моделях однакові значення вхідної концентрації цільового компоненту. Проте з часом в залежності від густини струму чітко видно, що якість очищення стічних вод краща там де більша сила струму. По суті, отримана модель дозволяє з оптимальними параметрами розрахувати при якій величині прикладеної сили струму будуть забезпечуватися задані показники концентрації цільового компоненту, що відповідають встановленим екологічним нормам. Також отримана модель дозволяє дослідити динаміку зміни вихідної концентрації забруднення не тільки при сталих вхідних параметрах, але й при змінних, що відповідає реальним процесам.

Представлені результати експериментів (табл. 1) і моделювання на рис. 3 свідчать про те, що отримана модель адекватно описує зміни, що проходять в реакторі. Відхилення, які найбільш видно на рис. 3 в) зумовлені розбіжністю і неточністю проведення експерименту, проте відмінно вказують характер і порядок зміни вихідної величини.

Згідно з рисунком 5 видно, що розроблена система автоматизації реагує на зміну вхідної концентрації забруднення і керує силою струму так, щоб згідно з розрахунками, які представлено в таблиці забезпечувалися мінімальні витрати електроенергії. Проте при такому керуванні видно на рис. 5, що концентрація іонів нікелю не перевищує встановлені норми.

### Висновки

Побудовано математичну модель, що описує закономірності процесів зміни концентрацій забруднення від прикладеної сили струму, об'ємної витрати рідини та геометричних розмірів реакторів. Знайдено розв'язок відповідної модельної задачі з використанням додатку Simulink середовища MatLab. Наведені результати розрахунків розподілу концентрації цільового компоненту на виході з коагулятора при зміні прикладеної сили струму. На основі отриманих результатів та експериментальних даних проведено порівняльну характеристику точності проведених розрахунків. Розроблено систему автоматизації для оптимального керування процесом на основі розрахунку мінімальних витрат електроенергії на очищення стічних вод, що забезпечує встановлені екологічні норми концентрацій забруднень на основі повних даних щодо розмірів реактора, витрат рідини, вхідних концентрацій.

### Список літератури:

1. *Кругликов С.С., Тураев Д.Ю., Бородулин А.А.* Локальная электрохимическая очистка промывных вод гальванотехники от ионов тяжелых металлов в щелевом диафрагменном электрокоагуляторе с нерастворимым анодом. // Гальванотехника и обработка поверхности. — 2004. — 12, № 4. — С. 35. 2. *Taheri, Mahsa & Alavi Moghaddam, Mohammad Reza & Arami, Mokhtar.* (2014). A comparative study on removal of four types of Acid Azo dyes using electrocoagulation process. *Environmental Engineering and Management Journal*. 13. 557-564. 3. *Гончаров Ф.І.* Аналітичне дослідження електролізних процесів системи безпечного водопостачання промислових об'єктів / Ф.І. Гончаров, В.М. Штепа // Вісник НАУ. — 2010. — № 10. — С. 240-244. 4. *Кульский, Л.А.* Очистка воды электрокоагуляцией. / Л.А. Кульский, П.П. Строкач, В.А. Слипенко, Е.И. Сайгак. К.: Будівельник, -1978. — 112с. 5. *Филатова Е.Г.* Оптимизация параметров электрокоагуляционного процесса на основе математиче-

ского моделирования / Е.Г. Филатова, Е.В. Кудрявцева, А.А. Соболева // Вестник ИрГТУ. — 2013. — № 4(75). — С. 117-123. 6. *Черных И.В.* Simulink: среда создания инженерных приложений. Диалог-МИФИ. 2003. 7. *Safonyk A.* Modelling the filtration processes of liquids from multicomponent contamination in the conditions of authentication of mass transfer coefficient. *Int. J. Math. Models and Methods in Appl. Sciences*. 2015. № 9. P. 189–192. 8. *Samir, Ahmed & Chelliapan, Shreeshivasan & Zakaria, Zuriati & Ajeel, Mohammed & Alaba, Peter.* (2016). A review of electrocoagulation technology for the treatment of textile wastewater. *Reviews in Chemical Engineering*. 33. 263-292. 10.1515/revce-2016-0019. 9. *Moussa, Dina & El-Naas, Muftah & Nasser, Mustafa & Al-Marri, Mohammed.* (2016). A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*. 186. . 10.1016/j.jenvman.2016.10.032. 10. *Sandoval, Miguel & Fuentes-Ramirez, R & Nava, José & Rodríguez, Israel.* (2014). Fluoride removal from drinking water by electrocoagulation in a continuous filter press reactor coupled to a flocculator and clarifier. *Separation and Purification Technology*. 134. 163–170. 10.1016/j.seppur.2014.07.034. 11. *Jean Nepo, Hakizimana & Bouchaib, Gourich & Chafi, Mohammed & Stiriba, Youssef & Vial, Ch & Drogui, Patrick & Jamal, Naja.* (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*. 404. 1-21. 10.1016/j.desal.2016.10.01. 12. *Y. Yavuz, Ü.B. Ögütveren,* Treatment of industrial estate wastewater by the application of electrocoagulation process using iron electrodes, *Journal of Environmental Management*, Volume 207, 2018, Pages 151-158. 13. *Atousa Ghaffarian Khorram, Narges Fallah,* Treatment of textile dyeing factory wastewater by electrocoagulation with low sludge settling time: Optimization of operating parameters by RSM, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 6, Issue 1, 2018, Pages 635-642. 14. *Jung Hwan Kim, Byung min An, Dae Hwan Lim, Joo Yang Park,* Electricity production and phosphorous recovery as struvite from synthetic wastewater using magnesium-air fuel cell electrocoagulation, *Water Research*, Volume 132, 2018, Pages 200-210.

Надійшла до редколегії 22.05.2018



О.Г. Руденко<sup>1</sup>, О.О. Безсонов<sup>2</sup>, О. С. Романюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ХНЕУ, м. Харків, Україна, oleg.rudenko@hneu.net;

<sup>2</sup> ХНЕУ, м. Харків, Україна, oleksandr.bezsonov@hneu.net;

<sup>3</sup> ХНУРЕ, м. Харків, Україна, romanyk@gmail.com

## ПРО ОДИН АЛГОРИТМ НАВЧАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ В ЗАДАЧІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ

У статті запропоновано метод навчання нейронних мереж при вирішенні задачі прогнозування часового ряду (ЧР). Більшість практичних задач прогнозування ЧР характеризуються високим рівнем нелінійності і нестационарності, зашумленістю, наявністю нерегулярних трендів, стрибків, аномальних викидів. У цих умовах жорсткі статистичні припущення про властивості ЧР часто обмежують можливості класичних методів прогнозування. Альтернативою статистичним методам можуть служити методи обчислювального інтелекту, до числа яких відносяться штучні нейронні мережі. Результати імітаційного моделювання підтвердили, що запропонований метод навчання нейронної мережі дозволяє значно підвищити точність прогнозування часових рядів.

ЧАСОВИЙ РЯД, ШТУЧНА НЕЙРОННА МЕРЕЖА, АЛГОРИТМ НАВЧАННЯ, АКТИВАЦІЙНА ФУНКЦІЯ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

**Руденко О.Г., Безсонов А.А., Романюк А.С. Об одном алгоритме обучения нейронных сетей в задачах прогнозирования временных рядов.** В статье предложен метод обучения нейронных сетей при решении задачи прогнозирования временного ряда (ВР). Большинство практических задач прогнозирования ВР характеризуются высоким уровнем нелинейности и нестационарности, зашумленности, наличием нерегулярных трендов, скачков, аномальных выбросов. В этих условиях жесткие статистические предположения о свойствах ВР часто ограничивают возможности классических методов прогнозирования. Альтернативой статистическим методам могут служить методы вычислительного интеллекта, к числу которых относятся искусственные нейронные сети. Результаты имитационного моделирования подтвердили, что предложенный метод обучения нейронной сети позволяет значительно повысить точность прогнозирования временных рядов.

ВРЕМЕННОЙ РЯД, ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ, АЛГОРИТМОВ ОБУЧЕНИЯ, АКТИВАЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**Rudenko O.G., Bezsonov O.O., Romanyk O.S. About one algorithm of training the neural network in the problem of the time series prediction.** The article proposes a method of neural networks training in solving the problem of prediction of the time series. Most of the predictive tasks of the time series are characterized by high levels of nonlinearity and non-stationary, noisiness, irregular trends, jumps, abnormal emissions. In these conditions, rigid statistical assumptions about the properties of the time series often limit the possibilities of classical forecasting methods. The alternative methods to statistical methods can be the methods of computational intelligence, which include artificial neural networks. The simulation results confirmed that the proposed method of training the neural network can significantly improve the prediction accuracy of the time series.

TIME SERIES, ARTIFICIAL NEURAL NETWORK, TRAINING ALGORITHM, ACTIVATION FUNCTION, SIMULATION

### Вступ

Задача прогнозування часових рядів (ЧР) була і залишається актуальною, особливо останнім часом, коли стали доступні потужні засоби збору та обробки інформації. Прогнозування часових рядів є важливою науково-технічною проблемою, так як дозволяє передбачити поведінку різних факторів в екологічних, економічних, соціальних та інших системах.

Розвиток прогностики як науки в останні десятиліття призвело до створення безлічі моделей і методів, процедур, прийомів прогнозування, нерівноцінних за своїм значенням. За оцінками зарубіжних і вітчизняних фахівців з прогностики вже налічується понад ста методів прогнозування, в зв'язку з чим постає завдання вибору методів, які давали б адекватні прогнози для досліджуваних процесів або систем.

До останнього часу основним при вирішенні задачі прогнозування був статистичний підхід. В рамках статистичних моделей вирішуються задачі прогнозування, знаходження прихованих періодичностей в даних, аналізу залежностей, оцінки ризиків при прийнятті рішень та інші. Загальним недоліком статистичних моделей є складність вибору типу моделі і підбору її параметрів. Крім того, при використанні статистичного підходу одним з головних вимог до часового ряду є його стаціонарність, яка полягає в тому, що розподіл його значень є інваріантним щодо моменту часу, для якого воно побудовано.

Традиційні статистичні методи аналізу ЧР часто виявляються неефективними з огляду на те, що ці методи потребують апріорної наявності досить великої і репрезентативної вибірки.

Слід, однак, відзначити, що більшість практичних задач прогнозованих ЧР характеризуються

високим рівнем нелінійності і нестационарності, зашумленістю, наявністю нерегулярних трендів, стрибків, аномальних викидів. У цих умовах жорсткі статистичні припущення про властивості ЧР часто обмежують можливості класичних методів прогнозування [1].

Альтернативою статистичним методам можуть служити методи обчислювального інтелекту, до числа яких, в першу чергу, слід віднести штучні нейронні мережі (ШНМ) [1-6]. Будучи універсальними апроксиматорами, деякі типи ШНМ дозволяють відновити з заданою точністю будь-яку як завгодно складну безперервну нелінійну функцію, використовуючи уявлення функції, що апроксимується у вигляді нейронної мережі, утвореної нейронами, параметри яких визначаються шляхом її навчання [7-9]. Здатність нейронної мережі до різнобічної обробці інформації впливає з її здатності до узагальнення і виділення прихованих залежностей між вхідними та вихідними даними. Істотною перевагою нейронних мереж є те, що вони здатні до навчання і узагальнення накопичених знань.

У даній роботі розглядається задача прогнозування часового ряду засобами нейронних мереж.

### 1. Багат шаровий персептрон як нейромережева модель

Метою будь-якого прогнозування є створення моделі, яка дозволяє прогнозувати майбутнє і оцінити тенденції в змінах того чи іншого фактора. Якість прогнозу в такому випадку залежить від наявності передісторії змінюваного чинника, похибок вимірювання даної величини і інших чинників.

Побудова математичної моделі, використовуваної при прогнозуванні, пов'язана з апроксимацією деяких, в загальному випадку нелінійних, функцій

$$y(x) = f(x) + \xi, \quad (1)$$

де  $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$  — вектор узагальненого вхідного сигналу  $N \times 1$ ;  $f(\bullet)$  — невідома нелінійна функція;  $\xi$  — завада;  $T$  — символ транспонування, тобто полягає в отриманні оцінки функції  $f(\bullet)$  за вимірюваннями вхідних і вихідних змінних.

Відсутність інформації про вид нелінійності часто призводить до неефективності традиційних методів апроксимації, а в ряді випадків — до їх непридатності.

З іншого боку, деякі типи ШНМ дозволяють відновити з заданою точністю будь-яку як завгодно складну безперервну нелінійну функцію, використовуючи уявлення функції, що апроксимується у вигляді нейронної мережі, утвореної нейронами, параметри яких визначаються шляхом її навчання на основі пред'явлення навчачих пар  $\{x(k), y(k)\}, k = 1, 2, \dots$ .

Серед найбільш широко застосовуваних для вирішення цієї задачі ШНМ (багат шаровий персептрон (БП), радіально-базисні мережі (РБМ) і мережа СМАС (Cerebellar Model Articulation Controller

[3–6]), досить ефективним є БП, який використовує апроксимації нелінійного оператора  $f(\bullet)$  виду

$$\hat{y}(x) = \hat{f}(x) = f^q \left[ (W^q)^T f^{q-1} \left[ (W^{q-1})^T f^{q-2} \left[ \dots f^1 \left[ (W^1 x + b_1)^T \right] \dots \right] \right] \right] + b_q, \quad (2)$$

де  $W^i$  — вектор вагових параметрів нейронів  $i$ -го шару мережі;  $f^i[\bullet]$  — активаційна функція (АФ)  $i$ -го шару;  $b_i$  — зміщення  $i$ -го нейрона.

В якості АФ найчастіше використовуються такі функції

$$f_{th}(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (3)$$

та

$$f_{log}(x) = \frac{1}{1 + e^x}. \quad (4)$$

Існують два основних підходи для надання нейронним мережам на базі БП властивостей, необхідних для обробки динамічних даних: додавання елементів затримок сигналу на вході мережі та додавання рекурентних зв'язків до внутрішньої структури мережі. В першому випадку, при використанні «методу часового вікна» [3-6], нейронна мережа отримує на вхід разом з поточним вхідним затримані в часі минулі значення вхідних сигналів. Навчання нейромережі здійснюється за відомим методом зворотного поширення (Backpropagation, BP) і з застосуванням градієнтних методів оптимізації (зокрема, методів Гауса-Ньютона, Левенберга-Маркуардта тощо). Незважаючи на простоту й технологічність цього підходу (за оцінками [10], зараз більш ніж в 90% випадків для прогнозування часових рядів використовується саме така схема), при його застосуванні необхідно апріорі визначити розмір часового вікна (це відповідає визначенню структури мережі), що суттєво впливає на якість прогнозування. Слід зазначити, що при використанні структури моделі не адекватній структурі динамічного процесу, залишається відкритим питання навчання нейромережі. Крім того, якщо при такому підході для багатокрокового прогнозу в якості вхідних даних використовуються власні прогнозні дані нейромережі, отримані для попередніх кроків, якість такого прогнозу буде низькою.

Іншим підходом введення динаміки в нейромережі прямого поширення є додавання внутрішніх рекурентних зв'язків у приховані, вхідні або вихідні шари нейромережі [2-4,10,12]. При цьому для визначення впливу минулих тактів на поточний результат вводиться обчислення спеціальних динамічних похідних шляхом «рекурентного навчання в реальному часі» або «зворотним поширенням в часі». Налаштування ваг нейромережі здійснюється також будь-яким градієнтним алгоритмом. Такі рекурентні мережі за своєю структурою більш відповідають динамічним процесам, що моделюються, і тому краще показують себе в



задачах керування і багатокрокового прогнозування. Разом з тим навчання таких мереж є більш важким завданням через додаткові ступені свободи в таких мережах. Крім того, при синтезі таких мереж необхідно досліджувати питання їх сталості, а при розрахунках динамічних похідних у перцептроноподібних мережах має місце ефект зникнення градієнта [3].

Таким чином, використання ШНМ вимагає вирішення задач структурної та параметричної оптимізації, відповідних вибору оптимальної топології мережі і її навчання (налаштування параметрів — в БП це вагові параметри і параметри АФ).

## 2. Алгоритм навчання мережі при відсутності завад $\xi(k)$

Розглянемо задачу прогнозування часового ряду, що описується рівнянням

$$y(k) = f(z(k)) = f(w^{*T} x(k)), \quad (5)$$

де  $z(k) = w^{*T} x(k)$ ,  $x(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_N(k))^T$  — вектор вхідних сигналів  $N \times 1$ ;  $x_i(k) = x(k - i - 1)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $f(\bullet)$  — невідома нелінійна функція;  $w^* = (w^*_1(k), w^*_2(k), \dots, w^*_N(k))^T$  — вектор вагових параметрів  $N \times 1$ ;  $T$  — символ транспонування.

Помилка прогнозування визначається таким чином

$$e(k) = y^*(k) - y(k), \quad (6)$$

де  $y^*(k)$  — сигнал, що прогнозується.

Точність прогнозування будемо оцінювати за критерієм

$$E(k) = 0,5e^2(k). \quad (7)$$

Як вже зазначалося вище, задача навчання ШНМ полягає в налаштуванні вектора її параметрів  $w(k)$  за формулою

$$w(k+1) = w(k) + \Delta w(k), \quad (8)$$

де

$$\Delta w(k) = -\gamma \nabla_w [E(k)]_{w=w(k)} \quad (9)$$

— приріст значень вектора параметрів;  $\gamma$  — коефіцієнт, що впливає на час навчання.

Для отримання правила налаштування розглянемо розклад помилки прогнозування на  $k+1$ -у кроці в ряд Тейлора і обмежимося лінійними членами

$$e(k+1) = e(k) + \left( \frac{\partial e(k)}{\partial w(k)} \right)^T \Delta w(k) + \left( \frac{\partial e(k)}{\partial x(k)} \right)^T \Delta x(k) + \frac{\partial e(k)}{\partial y^*(k)} \Delta y^*(k) + \dots \quad (10)$$

У зв'язку з цим квадрат помилки можна представити таким чином

$$e^2(k+1) = e^2(k) + 2e(k) \left( \frac{\partial e(k)}{\partial w(k)} \right)^T \Delta w(k) + \left\| \left( \frac{\partial e(k)}{\partial w(k)} \right)^T \Delta w(k) \right\|^2 \quad (11)$$

Враховуючи (5), (6) можна отримати наступні вирази для похідних в рівнянні (11)

$$\frac{\partial e(k)}{\partial w(k)} = -f'(z(k))x^T(k), \quad (12)$$

а

$$\begin{aligned} & \left\| \left( \frac{\partial e(k)}{\partial w(k)} \right)^T \Delta w(k) \right\|^2 = \\ & = \Delta w^T(k) \frac{\partial e(k)}{\partial w(k)} \left( \frac{\partial e(k)}{\partial w(k)} \right)^T \Delta w(k). \end{aligned}$$

Це дозволяє записати (9) наступним чином

$$\Delta w(k) = -\gamma e(k) f'(z(k)) x(k). \quad (13)$$

Враховувши, що

$$\begin{aligned} & \Delta w^T(k) \frac{\partial e(k)}{\partial w(k)} \left( \frac{\partial e(k)}{\partial w(k)} \right)^T \Delta w(k) = \\ & = \Delta w^T(k) (-f'(z(k))x(k)) (x^T(k) (-f'(z(k)))) \Delta w(k), \end{aligned}$$

можна записати наступний вираз для  $e(k+1)$ :

$$e(k+1) \approx e(k) [1 - \gamma |f'(z(k))|^2 \|x(k)\|^2],$$

що дозволяє представити  $e^2(k+1)$  так

$$e^2(k+1) = e^2(k) \left[ 1 - 2\gamma (f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2 + \gamma^2 (f'(z(k)))^4 \|x(k)\|^4 \right].$$

Для збіжності алгоритму (8, 9) необхідне виконання нерівності

$$\left| 1 - 2\gamma (f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2 + \gamma^2 (f'(z(k)))^4 \|x(k)\|^4 \right| < 1,$$

звідки маємо

$$0 < \gamma < \frac{2}{(f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2}. \quad (14)$$

З умови

$$\frac{\partial e^2(k+1)}{\partial \gamma} = 0$$

можна отримати вираз для оптимального значення параметра  $\gamma$ , при якому швидкість збіжності алгоритма навчання буде максимальною

$$\gamma^{\text{опт}}(k) = \frac{1}{(f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2}, \quad (15)$$

тобто отримуємо алгоритм Качмажа (Уідрою-Хоффа) [3-6].

При застосуванні АФ виду (3), (4) похідні, що використовуються в (14), (15) легко обчислюються за формулами ( для нашого випадку)

$$f'_{th}(z(k)) = z(k)(1 - f^2_{th}(z(k)))$$

$$f'_{\log}(z(k)) = z(k)f_{\log}(z(k))(1 - f_{\log}(z(k)))$$

або

$$f'_{th}(w^T x) = x(k)(1 - f^2_{th}(w^T x)),$$

$$f'_{\log}(w^T x) = x(k)f_{\log}(z(k))(1 - f_{\log}(w^T x)).$$

Для підвищення обчислювальної стійкості процедури навчання слід скористатися регуляризацією алгоритму навчання [16-18], тобто замість (15) взяти

$$\gamma'(k) = \frac{1}{(f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2 + \delta(k)}, \quad (16)$$

де  $\delta(k) > 0$  – параметр регуляризації.

По аналогії з (14) неважко отримати, що для збіжності регуляризованого алгоритму необхідне виконання нерівності

$$0 < \frac{1}{(f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2 + \delta(k)} < \frac{2}{(f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2}. \quad (17)$$

З нерівності (17) отримуємо, що регуляризований алгоритм буде збігатися, якщо параметр параметр регуляризації  $\delta(k)$  задовольняє нерівності

$$\delta(k) > -\frac{1}{2}(f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2. \quad (18)$$

Як видно з (18), параметр  $\delta(k)$  є змінним у часі і може коригуватися на кожному кроці при надходженні нової інформації, наприклад, таким чином

$$\delta(k) = \delta(k-1) - \alpha \nabla_{\delta} [E(k)]_{\delta=\delta(k)}. \quad (19)$$

Така процедура була розглянута в роботі [17]. Однак при цьому, на що не звернули увагу автори цієї роботи, виникає задача визначення оптимального значення параметра  $\alpha$ . Тому доцільним є використання параметра  $\delta(k) = \delta = const$ , величина якого визначається окремо для кожної конкретної задачі. Деякі рекомендації щодо вибору  $\delta$  можна знайти в [16–18].

### 3. Навчання мережі при наявності обмежених завад $\xi(k)$

Якщо щодо перешкоди відомо тільки, що вона обмежена по амплітуді

$$|\xi(k)| < \beta, \quad (20)$$

для оцінювання параметрів застосовуються методи, які не використовують ніякої інформації про статистичні властивості збурень крім їх приналежності до деякого обмеженого інтервалу.

В даний час для оцінювання параметрів при наявності обмежених завад найбільш широкого поширення набули алгоритми, в основі побудови яких лежить метод політопів (і як окремий випадок — ортотопів), алгоритми, що містять зону нечутливості і алгоритми на основі побудови еліпсоїдів.

Якщо про перешкоди відомо, що вони задовольняють умові (20), то ця інформація може бути врахована в алгоритмі, що містить зону нечутливості. При цьому знижуються вимоги щодо знання властивостей завади, однак огрублюється і сам алгоритм навчання.

Ідея використання в алгоритмі зони нечутливості заснована на тому, що навіть в разі точного визначення параметрів моделі залишається помилка (неузгодженість між вихідними сигналами

об'єкта і моделі), величина якої визначається величиною завади (20).

Широке поширення набуло використання елементів, що реалізують зону нечутливості, яка описується співвідношенням

$$g(e(k), \beta) = \begin{cases} e(k) - \beta \operatorname{sign}(e(k)), & \text{якщо } |e(k)| \geq \beta; \\ 0, & \text{якщо } |e(k)| < \beta. \end{cases} \quad (21)$$

Розглянемо градієнтний алгоритм виду

$$w(k+1) = w(k) + \gamma g(e(k), \beta) f'(z(k)) x(k), \quad (22)$$

що містить зону нечутливості  $g(e(k), \beta)$ .

Тут  $\gamma > 0$  — деякий параметр, що впливає на швидкість збіжності.

Введемо помилку оцінювання

$$\Theta(i) = w^* - w(i), \quad i = 1, 2, \dots$$

і функцію Ляпунова виду  $V(i) = \|\Theta(i)\|^2$ .

Після вирахування з обох частин (22)  $w^*$  маємо

$$\Theta(k+1) = \Theta(k) - \gamma g(e(k), \beta) f'(z(k)) x(k). \quad (23)$$

Помноживши зліва обидві частини (23) на  $\Theta^T(k+1)$ , отримуємо

$$\begin{aligned} \|\Theta(k+1)\|^2 &= \|\Theta(k)\|^2 - \\ &- 2\gamma g(e(k), \beta) f'(z(k)) \Theta^T(k) x(k) + \\ &+ \gamma^2 g^2(e(k), \beta) (f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2. \end{aligned} \quad (24)$$

Розглянемо приріст функції Ляпунова

$$\Delta V(k+1) = V(k+1) - V(k). \quad (25)$$

Для збіжності алгоритму необхідно, щоб

$$\Delta V(k+1) < 0. \quad (26)$$

Підстановка (24) в (25) дає

$$\begin{aligned} \Delta V(k+1) &= -2\gamma g(e(k), \beta) f'(z(k)) \Theta^T(k) x(k) + \\ &+ \gamma^2 g^2(e(k), \beta) (f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2. \end{aligned}$$

Приймаючи до уваги, що

$$\Theta^T(k) x(k) f'(z(k)) = e(k) - \xi(k) \quad \text{і } \gamma > 0,$$

можна визначити, що для виконання (26), необхідно, щоб

$$g^2(e(k), \beta) \leq \frac{2(e(k) - \xi(k)) g(e(k), \beta)}{\gamma (f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2}. \quad (27)$$

У зв'язку з тим, що

$$g^2(e(k), \beta) = |g(e(k), \beta)| \operatorname{sign}(e(k), \beta),$$

а

$$\operatorname{sign}(e(k), \beta) = \operatorname{sign} e(k),$$

умова збіжності (27) буде мати вигляд

$$|g(e(k), \beta)| \leq \frac{2}{\gamma (f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2} [|e(k) - \xi(k)| \operatorname{sign}(e(k))].$$

Крім того, з огляду на те, що завада  $\xi(k)$  обмежена (22) і навчання відбувається при  $|e(k)| \geq \delta$ , дану умову можна переписати так:

$$|g(e(k), \beta)| \leq \frac{2}{\gamma(f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2} [|e(k) - \xi(k)|]. \quad (28)$$

Таким чином, значення  $g(e(k), \beta)$  залежить як від величини вільно обраного параметра  $\gamma$ , так і від значень  $f'(z(k))^2 \|x(k)\|^2$ .

Аналогічно для алгоритму

$$w(k+1) = w(k) + \gamma \frac{g(e(k), \delta) f'(z(k)) x(k)}{(f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2}, \quad (29)$$

де  $\gamma > 0$  — деякий параметр, неважно показати, що його збіжність буде спостерігатися при виконанні умови

$$|g(e(k), \beta)| \leq \frac{2}{\gamma} [|e(k) - \delta|]. \quad (30)$$

Для регуляризоване алгоритму

$$w(k+1) = w(k) + \gamma \frac{g(e(k), \delta) f'(z(k)) x(k)}{(f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2 + \delta} \quad (31)$$

нескладно отримати таку умову збіжності:

$$|g(e(k), \beta)| \leq \frac{2A}{\gamma} (|e(k) - \beta|), \quad (32)$$

де  $A = 1 + \frac{\delta}{(f'(z(k)))^2 \|x(k)\|^2}$ .

Як видно з наведених результатів, для монотонної збіжності процедур повинні виконуватися відповідні умови на кожному такті процесу навчання. Так як ці умови збіжності накладають цілком певні обмеження на величину зони нечутливості, доцільно ввести її корекцію зон на кожному такті. З іншого боку, параметри зон нечутливості залежать від характеристик присутніх перешкод. Якщо наявність інформації про характеристики перешкоди (зокрема, значення параметра  $\beta$ , що входить в (22)) спрощує вибір зони нечутливості, то її відсутність суттєво ускладнює її вибір. Тому доцільним видається адаптивна настройка величини зони нечутливості, здійснювана в міру надходження нової інформації.

### Висновки

В роботі наведено результати дослідження властивостей градієнтного алгоритму навчання нейромережі (багатошарового перцептронну). Отримано умови збіжності алгоритму і вираз для оптимального значення параметру збіжності, яке забезпечує максимальну швидкість навчання. Крім того, визначено умови збіжності для регуляризованого алгоритму навчання. Показано, що можливим є визначення значення оптимального параметру регуляризації, який є змінним у часі, шляхом мінімізації деякого, зокрема, квадратичного функціоналу. Однак при цьому виникає питання визначення оптимального іншого параметра. Тому доцільним є використання постійного параметру регуляризації, значення якого залежать від необхідної точності задачі, що вирішується.

Отримані умови збіжності алгоритмів навчання, які використовують зону нечутливості, за наявністю обмежень завад. Показано, що параметри цієї зони залежався від характеристик присутніх завад. Відсутність такої інформації суттєво ускладнює вибір величини зони нечутливості і обумовлює доцільність її адаптивного налаштування, яке здійснюється при надходженні нової інформації.

### Список літератури:

1. Снитюк В. Е. Прогнозирование. Модели, методы, алгоритмы: учебное пособие. / В.Е. Снитюк / — К.: «Маклаут», 2008. — 364 с.
2. Mandic D. P. Recurrent Neural Networks for Prediction: Learning Algorithms, Architectures and Stability. / D. P. Mandic, J. A. Chambers / John Wiley & Sons, 2001. — 285 p. [https://doc.lagout.org/science/0\\_ComputerScience/3\\_Theory/NeuralNetworks/RecurrentNeuralNetworksforPrediction.pdf](https://doc.lagout.org/science/0_ComputerScience/3_Theory/NeuralNetworks/RecurrentNeuralNetworksforPrediction.pdf)
3. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин / Пер. с англ. — М.: Вильямс, 2006. — 1104 с.
4. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский / Пер. с польского. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 344 с.
5. Руденко О.Г. Основы теории искусственных нейронных сетей / О.Г. Руденко, Е.В. Бодянский. — Харьков: ТЕЛЕТЕХ, 2002. — 317 с.
6. Бодянский Е.В. Искусственные нейронные сети: архитектура, обучение, применение / Е.В. Бодянский, О.Г. Руденко. — Харьков: ТЕЛЕТЕХ, 2004. — 372 с.
7. Cybenko G. Approximation by superposition of a sigmoidal function / G. Cybenko / Math. of controls, Signals & Systems. — 1989. — 2. — P.303-314.
8. Hornik K. Multilayer feedforward networks are universal approximators / K. Hornik, M. Stinchcombe, H. White / Neural Networks. — 1989. — v.2. — P.359-366.
9. Poggio T. Networks for approximation and learning / T. Poggio, F. Giorosi / Proc. IEEE. — 1990. — V.78. — №9. — P. 1481-1497.
10. Чернодуб А. М. Навчання рекурентних нейронних мереж методом псевдорегуляризації для багатокрокового прогнозування часових рядів / А. М. Чернодуб / Математичні машини і системи. — 2012. — No 4. — С. 41–51.
11. Parras-Gutierrez E. Coevolution of lags and RBFNs for time series forecasting: L-Co-R algorithm. / E. Parras-Gutierrez, M. Garcia-Arenas, V.M. Rivas, V.J. Jesus / Soft Comput / 2012. -16(6). — P. 919–942.
12. Assaad M. A new boosting algorithm for improved time-series forecasting with recurrent neural networks / M. Assaad, R. Boner, H. Cardot / Information Fusion. —2008. —9. — P. 41–55.
13. Samsudin R. A comparison of time series forecasting using support vector machine and artificial neural network model. / R. Samsudin, F. Shabri, P. Saad / Journal of Applied Sciences.-2010. — 10(11). — P. 950–958.
14. Samanta B. Prediction of chaotic time series using computational intelligence. / B. Samanta / Expert Syst Appl. —2011. —38(9). — P.11406–11411.
15. Maria J. Long-term time series prediction with the NARX network: an empirical evaluation. / J. Maria, J.P. Menezes, G.A. Barreto / Neurocomputing. — 2008. —71(16-18). — P. 3335-43.
16. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач. / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин / М.: Наука, 1980. - 223 с.
17. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. / Е.З. Демиденко /— М.: Финансы и статистика, 1981. - 302 с.
18. Райбман Н.С. Адаптивные модели в системах управления / Н.С. Райбман, В.М. Чадеев /— М.: Сов. радио, 1966. —159 с.
19. Goh S.L. A Nonlinear Neural FIR Filter With An Adaptive Activation Function/ S.L. Goh, M. Bozic, D. P. Mandic / Journal of automatic control, university of Belgrade. — 2003. — Vol. 13(1). — P. 1–5.

Надійшла до редколегії 26.01.2018

УДК 004.75

О.В. Кузнецов<sup>1</sup>, Л.Е. Чала<sup>2</sup>, С.Г. Удовенко<sup>3</sup><sup>1</sup> ХНУРЕ, м. Харків, Україна, oleksii.kuznetsov@nure.ua<sup>2</sup> ХНУРЕ, м. Харків, Україна, larysa.chala@nure.ua<sup>3</sup> ХНЕУ ім. С.Кузнеця, м. Харків, Україна, serhii.udovenko@nure.ua

## НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ МЕТОД КЕШУВАННЯ ДАНИХ

Розглянуто основні існуючі види кешування та алгоритми збереження даних в кеш-пам'яті. Запропоновано підхід до здійснення кешування на основі нейронних мереж. Проаналізовано результати роботи проекту-доказу концепції. Запропонований метод кешування розглянуто як вирішення проблеми алгоритму Беладі. Визначено перспективи використання нейромережевого методу кешування.

НЕЙРОННА МЕРЕЖА, КЕШ, МЕТОД КЕШУВАННЯ, АЛГОРИТМ БЕЛАДІ, ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАПИТІВ

**А.В. Кузнецов, Л.Э. Чала, С.Г. Удовенко. Нейросетевой метод кэширования данных.** Рассмотрены основные существующие виды кэширования и алгоритмы сохранения данных в кэш-памяти. Предложен новый вид кэширования на основе нейронных сетей. Проанализированы результаты работы проекта-доказательства концепта. Предложенный метод кэширования рассмотрен как решение проблемы алгоритма Беладии. Определены перспективы использования нейросетевого метода кэширования.

НЕЙРОННАЯ СЕТЬ, КЭШ, МЕТОД КЭШИРОВАНИЯ, АЛГОРИТМ БЕЛАДИ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАПРОСОВ

**O.V. Kuznetsov, L.E. Chala, S.G. Udovenko. Neural network data caching method.** Main existing types of caching and algorithms of saving cached data were analyzed. The new type of caching based on neural networks was proposed. Results of proof of concept project were analyzed. Proposed type of caching was reviewed as a solution to a problem of Belady algorithm. The scale of subject area to use neural type of caching was determined.

NEURAL NETWORK, CACHE, TYPE OF CACHING, BELADY ALGORITHM, QUERY PREDICTION

### Вступ

Одним із найбільш поширених способів оптимізації web-систем є кешування даних [1]. Дані, що знаходяться далеко від користувача, потребують значного часу на їх передачу. В більшості сучасних програм використовуються зустрічаються повільні операції, результати яких можна зберегти на деякий час. Це дозволяє оперативно видавати користувачам заздалегідь збережені дані. Основна мета кешування для веб-серверів — зменшення часу на отримання контенту, аби користувач якомога швидше отримував необхідні дані. Тому кешування, як відносно просту технологію, часто впроваджують в браузерях та проксі-серверах інформаційних систем.

Відзначимо, що суттєвий час витрачається на обробку даних системи зі сторони постачальника та передачу їх до клієнта. За цих умов, при наявності великих навантажень на канали системи кешування є особливо корисним. Воно дозволяє, зазвичай, обслуговувати більше клієнтів без додаткового збільшення ресурсів за рахунок скорочення навантажень на основні джерела даних. Втім, навіть при невеликих навантаженнях кешування може дуже позитивно вплинути на швидкість роботи с інформаційною системою.

Важливою проблемою забезпечення ефективності методів кешування є врахування фактору старіння даних. Якщо не перевіряти механізм зберігання закешованих даних, користувач може довгий час не отримувати актуальні дані, внаслідок

чого можуть блокуватися корисні потоки даних для багатьох клієнтів.

Тож дуже важливо розуміти, які саме дані є доцільно кешувати, щоб не зруйнувати логіку роботи системи. При цьому необхідно визначити, наскільки актуальними мають бути керовані дані. Враховуючи стрімке зростання потужностей, що використовуються для підтримки роботи інформаційних систем, доцільним є залучення до вирішення цього питання нейромережевих засобів.

У даній роботі досліджуються сучасні методи кешування та зберігання даних, а також пропонується нейромережевий підхід до реалізації процесу кешування з використанням алгоритму Беладі.

### 1. Аналіз існуючих видів кешування

Розглянемо три основних типи кешування даних, що використовуються в інформаційних системах [1, 2].

Lazy cache («ледачий» кеш) — найпростіший в реалізації тип кешування, що часто вбудовується в фреймворки. Такий кеш просто зберігає дані і видає їх, поки вони не застаріють.

Synchronized cache (синхронізований кеш) — клієнт разом з даними аналізує мітку останньої зміни і може запитувати у постачальника, чи не змінилися дані, щоб повторно це не запитувати. Такий тип кешування дозволяє завжди мати актуальні дані, але є дещо складним в реалізації.

Write-through cache (кеш наскрізного запису) — будь-яка зміна даних відображається відразу

в сховищі і в кеші. Цей тип кешу може ніколи не застарівати, але при цьому виникають проблеми з так званою когерентністю процесу.

Обсяг кешу завжди обмежений. Найчастіше він менше обсягу даних, які в цей кеш можуть надходити, тому елементи, поміщені до кешу, рано чи пізно будуть замінені. Сучасні фреймворки для кешування дозволяють достатньо гнучко управляти старінням, з оглядом на пріоритети, час старіння, обсяги даних тощо.

Якщо одні й ті ж дані потрапляють в різні кеші, то виникає проблема когерентності кешу. Наприклад, одні й ті ж дані можуть використовуватися для формування різних сторінок їх кешування. Сторінки, які сформовані пізніше, будуть містити оновлені дані, а сторінки, що кешувалися раніше, будуть містити застарілі дані. В цьому разі буде порушена узгодженість поведінки.

Простий спосіб підтримки когерентності - примусове старіння (скидання) кешу при зміні даних. Тому збільшення пам'яті для кешу, щоб він менше застарівав, не завжди є доцільним.

Основний параметр, який характеризує систему кешування — це відсоток влучень запитів в кеш. Цей параметр досить легко виміряти, щоб зрозуміти наскільки система кешування ефективна. Часті скиди кешу, кешування рідко запитуваних даних, недостатній обсяг призводять до марної трати оперативної (зазвичай) пам'яті, не підвищуючи ефективність роботи.

Іноді дані змінюються настільки часто і непередбачувано, що кешування не дає ефекту, а відсоток влучень буде близький до нуля. Але зазвичай дані зчитуються набагато частіше, ніж записуються, тоді кеші є ефективними.

Ледачий кеш — це найпростіший вид кешування, але його потрібно використовувати обережно, так як він часто дає застарілі дані. Можна при кожному записі скидати ледачий кеш, щоб підтримувати актуальність даних, але тоді витрати на реалізацію будуть високими в порівнянні з більш складними типами кешування.

На рис. 1. наведено псевдокод одного з можливих варіантів реалізації ледачого кешу.

```
getElement(elementId) {
    if (isElementAlreadyPresent(elementId)) {
        element = loadFromCache(elementId)
        if (element.isOld()) {
            element = loadFromDB(elementId)
            saveToCache(element, currentTime)
        }
    } else {
        element = loadFromDB(elementId)
        saveToCache(element, currentTime)
    }
    return element
}
```

Рис. 1. Псевдокод реалізації ледачого кешу

Такий тип кешування можна використовувати для даних, які майже ніколи не змінюються. Інший варіант його використання — створити ледачий кеш з невеликим часом старіння для стабільної роботи при сплесках навантаження. Такий тип ледачого кешування дозволить швидше давати відповідь при запитах.

Синхронізований кеш — це найкорисніший тип кешування, так як віддає свіжі дані і дозволяє реалізувати багаторівневий кеш. Такий тип кешування вбудований, зокрема, в протокол HTTP. Сервер віддає мітку зміни, а клієнт кешує у себе результат і в подальшому запиті передає цю мітку. Сервер може дати відповідь, що стан не змінився і можна використовувати кеш на клієнтному об'єкті. Сервер, в свою чергу, після отримання мітки може перепитати у сховища, були зміни чи ні. На рис. 2. наведено псевдокод одного з можливих варіантів реалізації синхронізованого кешу.

```
getElement(elementId, knownStateHash) {
    if (isElementAlreadyPresent(elementId)) {
        element = loadFromCache(elementId)
        if (element.getHash() != knownStateHash)
            element = loadFromDB(elementId)
            saveToCache(element)
    } else {
        element = loadFromDB(elementId)
        saveToCache(element)
    }
    return element
}
```

Рис. 2. Псевдокод реалізації синхронізованого кешу

Цей тип кешування не рятує від значних витрат на спілкування між системами. Тому часто він доповнюється іншими типами кешування, щоб прискорити роботу.

Розглянемо особливості кешу наскрізного запису. Його доцільно використовувати в системах розподіленого кешування (memcached, Windows Sever App Fabric, Azure Cache). Ручна реалізація процесу синхронізації кешів між вузлами є дуже затратною, тому її зазвичай не застосовують в рамках розробки програм. На рис. 3. наведено псевдокод одного з можливих варіантів реалізації наскрізного кешу.

```
getElement(elementId) {
    element = loadFromCache(elementId)
    return element
}

changeElement(elementId) {
    element = loadFromDB(elementId)
    performChanging(element)
    saveToDB(element)
    saveToCache(element)
}
```

Рис. 3. Псевдокод реалізації наскрізного кешу

Не варто намагатися кешувати всі дані в синхронізованому кеші, інакше велика частина коду програми буде займатися перебудовою кешу. Також не варто забувати, що системи розподіленого кешування також вимагають спілкування між системами, що може позначатися на швидкодії обміну даними.

Надзвичайно важливо обрати правильну гранулярність даних, що кешуються. Наприклад, кешування даних для кожного користувача швидше за все буде неефективним при великій кількості користувачів. Якщо кешувати дані для всіх користувачів разом, то можуть виникати проблеми зі старінням даних і когерентністю кешу.

Зазвичай дані кешуються дані зазвичай безпосередньо перед надсиланням в зовнішню систему. Кешувати дані, які були отримані ззовні, доцільно тільки в разі проблем з продуктивністю на цьому етапі. Зовнішні сховища, такі як СУБД і файлові системи, самі реалізують процес кешування.

## **2. Особливості застосування нейронних мереж для прогнозування запитів**

На даний момент існує велика кількість задач, які неможливо вирішити без наявності великих потужностей, тому що для їх обробки необхідно мати великий обсяг пам'яті, а не лише процесорний час. Саме тому у сучасному світі існують і створюються спеціалізовані центри даних. Більше того, деякі з цих задач необхідно вирішувати з безпосередньою участю людини, тому питання миттєвого опрацювання запитів підіймається дуже часто.

Існує чимало систем, які використовують аналітику, основану на великих об'ємах даних. До них можна віднести як інформаційні системи для широкого кола користувачів (сайт мобільного оператора, систему пошуку квитків тощо), так і внутрішні корпоративні системи. Можна стверджувати, що користувачі таких систем на очікування результату запиту завжди витрачають більше часу, ніж для створення цього запиту. Що ж стосується самих запитів, то їх критерії часто повторюються. Деякі критерії можна спрогнозувати (вибірку за поточний місяць, вибірку серед усіх даних, доступних лише конкретному користувачеві тощо).

Зважаючи на усі передбачувані параметри, можна спрогнозувати запит за деякий час до того, як він буде складений, і зберегти результат його виконання. Коли користувач захоче отримати результат цього запиту, системі не потрібно буде виконувати його ще раз, аже результат можна буде отримати миттєво з пам'яті.

Слід відзначити, що задачу прогнозування можливих запитів дуже зручно розглядати з оглядом на можливість використання для цього нейронних мереж. Важко знайти сучасну інформаційну систему з великим об'ємом даних, яка б не збирала

статистику по користувачам і їх діям. Зазвичай це допомагає мати краще уявлення про те, як клієнти користуються системою, які саме запити складаються найчастіше і де користувачі витрачають найбільше часу, щоб прискорити популярні частини системи. Для нейронної мережі це означає, що даних для навчальної вибірки завжди буде вдосталь. Більше того, вибірка буде поповнюватися з кожним днем і можна буде легко налаштувати нейромережу на основі реальних результатів її роботи.

Звичайно, навчання нейронної мережі, та її робота вимагає чимало ресурсів, але для крупних аналітичних систем такі витрати є цілком адекватними.

Розглянемо більш детально завдання для прогнозування, формування навчальної вибірки та визначення необхідних ресурсів.

Відбір даних для навчальної вибірки залежить, насамперед, від типу і напрямку інформаційної системи. Визначимо загальні правила формування навчальної вибірки.

Вихідні дані прогнозування формуються за допомогою набору фільтрів у запиті. Наприклад, для сайту мобільного оператора це може бути запит на виписку по грошовим витратам конкретного рахунку. Тут фільтрація буде виконана по ідентифікатору користувача, що виконав запит та часовому інтервалу результатів запиту. Для користувача корпоративної аналітичної системи вихідними даними буде набір фільтрів, що користувач власноруч відправив на обробку в систему.

Розглядаючи можливості оптимізації процесу зберігання результатів запиту, можна також брати до уваги час виклику запиту до вихідних даних, щоб виконати запит лише безпосередньо перед тим, як він знадобиться і не тримати результат запиту у пам'яті протягом деякого часу. Для багатьох корпоративних систем час виклику запиту буде достатнім для прогнозування часу його виклику наступного разу. Але існують варіанти, в яких ключову роль відіграє не час виклику, а стан бази даних. Так, наприклад, оператору порту важливо отримувати інформацію про стан складів після того, як він отримав повідомлення про закінчення розгрузки вантажного човна. Як відомо, час розгрузки, так само як і час прибуття, завжди різний і може відрізнитися не тільки годинами, а й днями.

Вхідні дані можуть кардинально відрізнитися в залежності від напрямку інформаційної системи. Для промислових інформаційних систем дуже важливо враховувати специфіку підприємства та загальний напрям його роботи. Працюючи з системою, що аналізує та підсумовує фінансові операції, логічно було б сказати, що на вхід нейронної мережі необхідно додати дані про користувача та його предметну область. Так можна опрацювати сценарій, в якому кожен клієнт інформаційної

системи відповідає за певну частину її даних. Тож маючи свідчення про те, що зазвичай запитує користувач, можна буде заздалегідь підготувати відповідь. Питання використання ресурсів є також відкритим. Архітектура системи та динаміка її використання значно впливають на можливі сценарії залучення нейронної мережі. Якщо на вході маємо систему, якою користуються багато клієнтів з географічно віддалених регіонів, то вона повинна бути доступна цілодобово. Це означає, що нейромережа має постійно навчатися і відповідати на запити. Якщо ж ми маємо систему, що працює з великими даними лише деяку частину дня, то доцільно використовувати час бездіяльності для прогнозування запитів на наступний бізнес-день. Таким чином, навантаження на систему буде рівномірним протягом доби і необхідність у виділенні додаткових ресурсів значно зменшиться. На рис. 4. наведено псевдокод одного з можливих варіантів реалізації нейромережевого кешу.

```

getElement(elementId) {
    if (isElementAlreadyPresent(elementId)) {
        element = loadFromCache(elementId)
    } else {
        element = loadFromDB(elementId)
        saveToCache(element, currentTime)
    }
    return element
}

analyzeElement(elementId) {
    possible = countPossibilitytoBeRequired(el
    if (possible) {

```

Рис. 4. Псевдокод реалізації нейромережевого кешу

Таким чином, існує можливість реалізації нового виду кешу – нейромережевого. Розглянемо далі сучасні алгоритми зберігання керованих даних у пам'яті.

### 3. Аналіз існуючих алгоритмів збереження кешованих даних

Найбільш ефективно правило кешового оновлення – видаляти з кешу ту інформацію, яка не знадобиться в майбутньому найдовше. Відповідне оптимальне кешування можна реалізувати за допомогою алгоритму Беладі або алгоритму передбачення [1]. У загальному випадку неможливо точно передбачити, коли саме в наступний раз буде потрібна саме та інформація, що видаляється, тому на практиці реалізація такого передбачення є дуже складною. Параметри прогнозування можуть бути обчислені лише експериментальним шляхом, після чого можна запропонувати модифікацію алгоритму кешування з прогнозуванням та порівняти з ним ефективність поточного алгоритму кешування.

Згідно з алгоритмом Least recently used (LRU) в першу чергу з кешу витісняються дані, що не використовувалися найдовше [2]. Цей алгоритм потребує відстеження динаміки використання даних, що вимагає чимало часу, особливо якщо потрібно проводити додаткову перевірку відповідної статистики. Загальна реалізація цього методу вимагає збереження контрольних бітів «віку» для рядків кешу, за рахунок чого відбувається відстеження найменш використаних рядків (тобто за рахунок порівняння таких бітів). У цьому алгоритмі при кожному зверненні до рядка кешу змінюється «вік» всіх інших рядків (рис. 5).

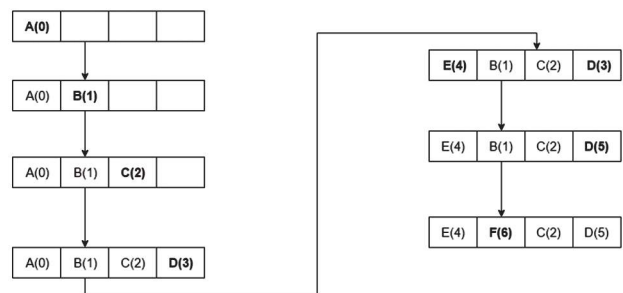


Рис. 5. Схема роботи LRU алгоритму

Згідно з алгоритмом Most Recently Used (MRU), на відміну від LRU, в першу чергу витісняється останній використаний елемент (рис. 6) [1]. Коли файл періодично сканується по циклічній схемі, то MRU є найкращим алгоритмом витіснення. Для схем довільного доступу і циклічного сканування великих наборів даних (іноді званих схемами циклічного доступу) алгоритми кешування MRU мають більше влучень в порівнянні з LRU за рахунок їх прагнення до збереження старих даних. Алгоритми MRU найбільш корисні у випадках, коли відбувається більше звернень до найстаріших елементів.

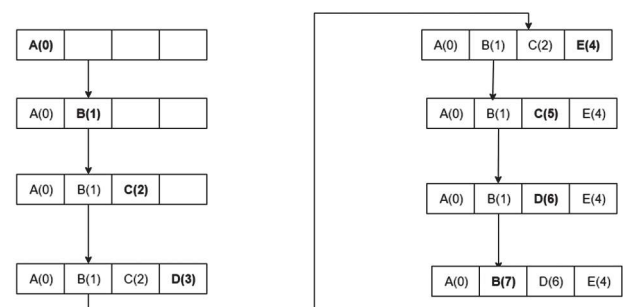


Рис. 6. Схема роботи MRU алгоритму

Для кешів з великою асоціативністю, ціна реалізації алгоритмів LRU стає непомірно високою. Якщо майже завжди потрібно відкидати найменш використовуваний елемент, то в цьому випадку більш ефективним є алгоритм PLRU (псевдо-LRU), що вимагає для елементів кешу тільки один додатковий біт (рис. 7) [3].

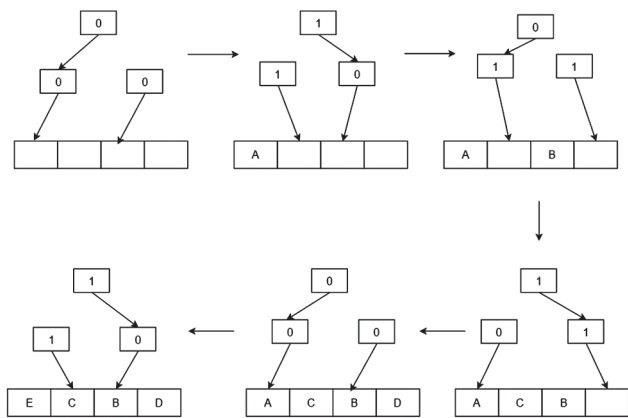


Рис. 7. Схема роботи PLRU алгоритму

Згідно з алгоритмом сегментованого LRU (Segmented LRU або SLRU) SLRU-кеш ділиться на пробний та захищений сегменти (рис. 8) [4]. Рядки в кожному сегменті впорядковані від часто використовуваних до найменш використовуваних. Дані в разі невлучень додаються в область останніх використаних елементів пробного сегмента кешу. Дані при влучанні видаляються (незалежно від місця їх розташування) і додаються в область часто використовуваних елементів захищеного сегменту. Таким чином, звернення до рядків захищеного сегменту відбуваються принаймні двічі. Перенесення рядку з пробного сегменту в захищений сегмент може викликати перенесення останнього використаного (LRU) рядку в захищеному сегменті в MRU-область пробного сегменту, даючи цієї лінії другий шанс бути використаною перед витісненням. Розмір захищеного сегмента є важливим SLRU-параметром, який змінюється в залежності від схеми роботи введення-виведення. Кожного разу, коли дані повинні бути витіснені з кешу, рядки запитуються з LRU-кінця пробного сегменту.

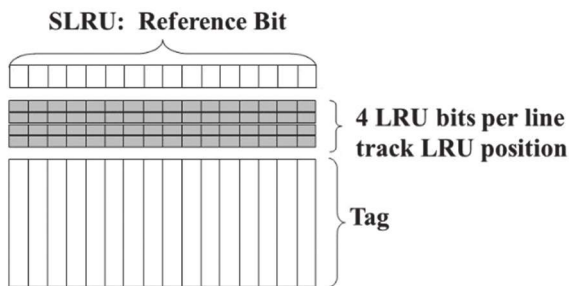


Рис. 8. Схема роботи SLRU алгоритму

Для високошвидкісного процесорного кешу, де навіть PLRU є занадто повільною, застосовується 2-канальна асоціативність (2-Way Set Associative) (рис. 9). Адреса нового елемента використовується для обчислення одного з двох можливих місцезнахожень в кеші (у відведеній для цього області). За алгоритмом LRU два елементи витісняються. Це вимагає одного біту для пари рядків кешу, де зазначається, який з них використовувався останнім.

Кеш прямого відображення (Direct-mapped cache): застосовується для високошвидкісних кешів процесора, де не вистачає швидкодії 2-канального асоціативного кешування (рис. 9) [5]. Адреса нового елемента використовується тут для обчислення місцезнахоження в кеші (у відведеній для цього області, все, що було раніше, витісняється).

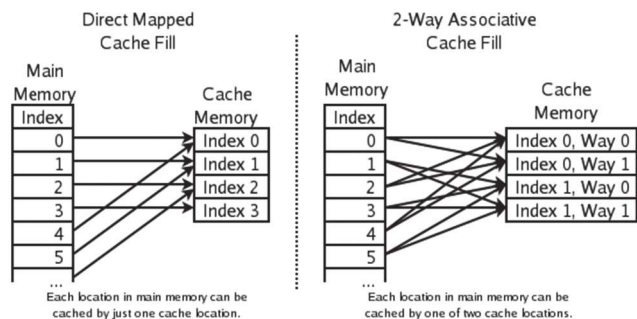


Рис. 9. Схеми роботи Direct-mapped та 2-Way Set Associative алгоритмів

Алгоритм многопоточного кешування даних (Multi Queue caching algorithm) додає ваги до елементів кешу (рис. 10). Зокрема, зважаються: елементи з різною вартістю зберігання, запит до яких і їх отримання вимагають багато часу; елементи, що мають різний розмір в кеші (кеш може спробувати витіснити більший елемент, щоб зберегти кілька менших елементів); елементи, що застарівають з плином часу (деякі кеші зберігають застарілу інформацію, наприклад, кеш новин, DNS-кеш або кеш веб-браузера). Комп'ютер може витіснити елементи внаслідок їх старіння. Залежно від розміру кешу, кешування нових елементів може підштовхнути витіснення старих [6].

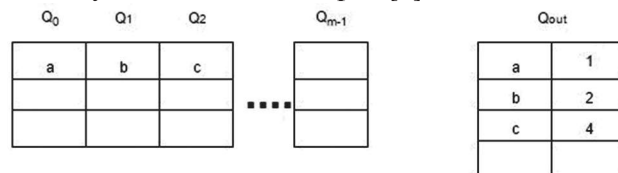


Рис. 10. Схема роботи MQ алгоритму

Існують також різні алгоритми для забезпечення когерентності кешу. Це застосовується тільки у випадках, коли декілька незалежних кешів використовується для зберігання однієї і тієї ж інформації (наприклад, декілька серверів баз даних оновлюють загальний файл даних).

#### 4. Використання нейромереж для реалізації алгоритму Беладі

Для вирішення завдань кешування даних в інформаційних системах, що потребують використання значних потужностей, найбільш привабливим є застосування алгоритмів SLRU та MQCA, що в деякій мірі можна інтерпретувати як спрощені варіанти вирішення проблеми реалізації алгоритму Беладі. Слід відзначити, що їх безпосереднє використання за допомогою класичних



обчислювальних засобів потребує додаткових зусиль і не гарантує отримання оптимальних результатів. Доречним буде розглянути можливість нейромережевої реалізації алгоритму Беладі.

Як було відзначено вище, головною проблемою практичної реалізації цього алгоритму є у передбаченні часу використання кешу. Таке передбачення можна здійснити за допомогою нейронної мережі з додаванням необхідних часових параметрів процедури кешування. Розглянемо загальний сценарій використання таких параметрів для інформаційних систем підприємств та організацій, що, безумовно, залежить від конкретної предметної області.

Більшість підприємств та потужних організацій працюють зі своїми внутрішніми корпоративними системами протягом бізнес дня. Це означає, що потік робочих процесів та відповідних запитів до системи можна розділити на умовні ітерації. Тривалість такої ітерації буде залежати від початку та кінця роботи користувачів інформаційної системи в усіх часових поясах. Оскільки нейромережа, що передбачається використовувати для кешування за алгоритмом Беладі, має працювати з великим обсягом даних, то мінімальною одиницею виміру часу у відповідних процедурах передбачення доцільно вибрати годину.

Специфіка конкретних підприємств може передбачати повторення багатьох процесів обробки даних протягом року (наприклад, фінансові розрахунки є обов'язковими на початку та в кінці фінансового періоду). Це означає що в процедуру прогнозування слід додати параметр, що відповідає за місяць виконання запитів.

Іноколи існує необхідність розглядати часові ітерації з урахуванням тижня виконання завдань обробки даних. Подібна організація роботи зустрічається не так часто, як помісячна, але також повинна братися до уваги. У такому разі додатковим параметром буде номер дня у тижні.

Треба відзначити, що організація бізнес процесів та ітерацій для інформаційних систем підприємств та організацій суттєво відрізняється. У деяких випадках існує чітке визначення поняття ітерації, що значно полегшує задачу визначення часу для збереження запиту. В реалізації такої системи поняття максимальної одиниці часу може становити день, а кількість можливих варіантів буде дорівнювати кількості днів у бізнес ітерації підприємства.

Для врахування людського фактору та можливих ризиків слід додати до параметрів прогнозувальної нейромережі спеціальний буфер, розмір якого цілком залежить від предметної області системи та значення якого може корегуватися під час роботи системи. Майже напевно цей параметр не буде перевищувати п'ятдесят відсотків від можливого діапазону значень часу і має бути більшим за один

відсоток. Таким чином, доцільно використовувати часові параметри слід з буфером у двадцять п'ять відсотків від діапазону можливих значень часу. На рис. 11 наведено загальну схему роботи нейромережевого методу кешування з використанням алгоритму Беладі.

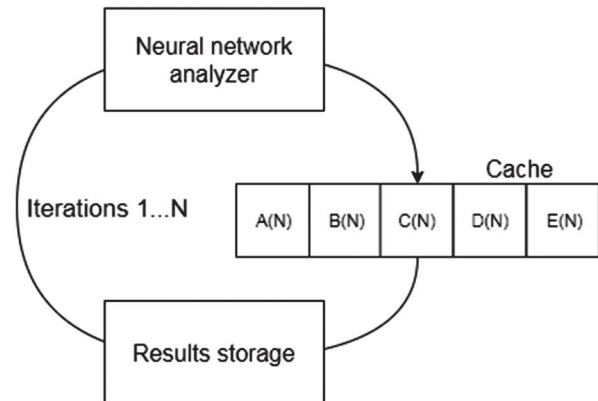


Рис. 11. Загальна схема роботи нейромережевого алгоритму кешування

Процедура Беладі реалізується з використанням нейромережевого аналізатора NNA (Neural network analyzer). Виходом NNA є послідовність номерів сторінок, що заміщаються в кеші  $A(N), \dots, E(N)$  при обробці запитів.

Від предметної області відповідної системи буде залежати, чи потрібно зберігати результат запиту після того, як він був виконаний користувачем один раз. У деяких випадках важливо тримати результат у пам'яті доки він вважається актуальним і готовим до використання. Можливою є ситуація, коли можна з упевненістю сказати, що результат запиту нас більше не зацікавить після того, як він був завантажений клієнтом вперше.

Таким чином, нейромережевий підхід може вирішити проблему алгоритму Беладі за умов визначення ефективних часових ваг та діапазонів, а також використання додаткових ресурсів.

### 5. Стислий аналіз роботи проекту-доказу концепції

Для перевірки доцільності використання нейронної мережі для передбачення запитів до інформаційної системи (згідно з алгоритмом Беладі) було розроблено проект-доказ концепції. З цією метою (за допомогою багатопланової перцептронної нейромережі) було змодельовано аналітичну сервісну систему побудови складних транспортних маршрутів (АССТМ). Система дозволяє прокласти маршрут від однієї точки до іншої, враховуючи стан доріг, розклад громадського транспорту і багато інших параметрів. Користувачі сервісу – великі підприємства з тисячами вантажних перевозок на рік.

Очевидно, що сервіс не зможе миттєво відповідати на запити користувачів і буде використовувати

кеш, щоб прискорити хоча б наступні виклики запитів. У цьому разі неймережа допомагає прискорити обробку першого виклику запиту конкретного маршруту клієнта.

Вхідні дані від користувача – перелік ключових точок маршруту (адреса або координати). Вихідні дані від сервісу – перелік усіх можливих маршрутів, які на даний момент використовують відомі перевізники по цим критеріям.

Навчання неймережі та прогнозування відбувається після завершення бізнес дня у користувачів. Таким чином, навантаження на систему є рівномірним протягом доби і не заважає користувачам. Прогноз розраховується на наступний бізнес день.

Підсистема АССТМ, що визначає маршрути, спочатку знаходить найближчу відому їй точку у маршрутній базі та прокладає шлях від неї до наступної відомої точки. Відрізки від відомих точок до введених користувачем будуються окремо, використовуючи менший обсяг необхідної інформації. Тож маємо фіксований набір вхідних параметрів – перелік відомих системі точок у запиті, що відповідають початку шляху, кінцю і необхідним зупинкам. Для пілотного проекту на відображення цих точок достатньо буде виділити вектор на сто тисяч елементів. Другий важливий компонент вхідних даних – стан ринку перевозок. З урахуванням рекомендацій теорії логістики, далі будується продовження вектору на тисячу елементів. До вихідних даних неймережі додано час виклику запитів.

Вибірку для навчання було згенеровано випадково і скореговано так, щоб можна було простежити умовну закономірність навантаження на систему.

Готову реалізацію неймережі було взято з бази Encog Machine Learning Framework, що має можливість інтеграції з середовищем Java та містить інформаційні приклади. Тестові дані були збережені у PostgreSQL базі даних. Так як мета проекту полягає, насамперед, у перевірці концепції, неймережа має лише один прихований шар.

Після запуску системи неймережі доводилося приймати рішення, чи буде необхідним результат певного запиту наступного бізнес дня. Для перевірки використовувалися змінені дані з навчальної вибірки. Для навчання та роботи неймережі з проекту-доказу концепції знадобилося близько восьми гігабайтів.

Кінцева версія налаштованої неймережі змогла заздалегідь підготувати п'ятдесят сім зі ста запитів, а ще двадцять були підготовані помилково. Враховуючи, що дані були згенеровані випадково

і не відповідають реальній ситуації, а також те, що для навчання використовувалися ресурси набагато менші за потенційні ресурси кінцевих користувачів, такий результат можна назвати успішним. Звичайно, обрана предметна область набагато ширше за спрощену модель даних у проекті-доказу концепції, але експеримент все-одно можна вважати вдалим. За наявністю достатніх ресурсів та спеціалістів у галузі конкретного питання можна побудувати неймережу, що буде значно ефективніше реалізовувати процедуру кешування даних за алгоритмом Беладі.

## Висновки

У статті був розглянутий новий спосіб кешування запитів за допомогою нейронної мережі. Цей спосіб дозволяє вирішити проблему алгоритму Беладі і досить влучно прогнозувати час актуальності збереження запиту. Запропонований алгоритм потребує дещо більше ресурсів, ніж існуючі аналоги, але дозволяє економити час клієнта, що користується аналітичною системою. Результати пілотного проектування свідчать про те, що застосування неймережевого типу кешування має сенс тільки для великих систем, що потребують багато часу на підготовку відповіді. Також важливим фактором доцільності такого застосування є наявність достатніх обчислювальних ресурсів. Для реалізації неймережевого типу кешування необхідним є попередній аналіз предметної області. Слід також відзначити, що обсяг необхідної обчислювальної потужності збільшується не прямо пропорційно обсягу даних в інформаційній системі, тож реалізація такого підходу буде особливо вигідна для корпоративних систем.

## Список літератури:

1. Чумаченко П.В. Мережі доставки контенту // П.В. Чумаченко, Т.А. Ліхоузова, О.І. Лісовиченко / Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління» № 2(29), 2016 – с. 78–89.
2. J. Z. Teng and R. A. Gumaer, «Managing IBM database 2 buffers to maximize performance», IBM Sys. J., vol. 23, no. 2, pp. 211–218, 1984.
3. P. Cao and S. Irani, «Cost-aware WWW proxy caching algorithms», in Proc. USENIX Symp. Internet Technologies and Systems, Monterey, CA, 1997.
4. L. Degenaro, A. Iyengar, I. Lipkind, and I. Rouvellou, «A middleware system which intelligently caches query results», in Middleware 2000, vol. LNCS 1795, pp. 24–44, 2000.
5. J. D. Gee, M. D. Hill, D. N. Pnevmatikatos, and A. J. Smith, «Cache performance of the SPEC benchmark suite», Tech. Rep. CS-TR-1991-1049, University of California, Berkeley, 1991.
6. M. N. Nelson, B. B. Welch, and J. K. Ousterhout, «Caching in the Sprite network file system», ACM Transactions on Computer Systems, vol. 6, no. 1, pp. 134–154, 1988.

Надійшла до редколегії 16.03.2018

УДК 004.93



А. Г. Кісляя, Л.Е. Чала, О.Є. Гриньова

ХНУРЕ, м. Харків, Україна, alla.kyslaia@nure.ua  
 ХНУРЕ, м. Харків, Україна, larysa.chala@nure.ua  
 ХНУРЕ, м. Харків, Україна, olena.hrinova@nure.ua

## НЕЙРОМЕРЕЖЕВА МОДЕЛЬ ВИЯВЛЕННЯ БОТІВ В СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Виконано аналіз видів соціальних ботів, виявлено їх вплив на користувачів. Описано ознаки, за якими можна визначити спамерських пошукових роботів. Проаналізовано алгоритми розподілу інформації соціальними мережами. Запропонована архітектура нейронної мережі для виявлення ботів, а також надані результати її роботи для аналізу користувачів мережі Twitter і їх твітів.

НЕЙРОННА МЕРЕЖА, БОТИ, МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ БОТІВ, РЕКУРЕНТНІ МЕРЕЖІ

А.Г. Кислая, Л.Э. Чала, Е.Е. Гринева. **Выявление ботов в соцсетях.** Выполнен анализ видов социальных ботов, выявлено их влияние на пользователей. Описаны признаки, по которым можно определить ботов. Проанализированы алгоритмы распределения информации социальными сетями. Предложена архитектура нейронной сети для выявления ботов, а также предоставлены результаты ее работы для анализа пользователей сети Twitter и их твитов.

НЕЙРОННАЯ СЕТЬ, БОТЫ, МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ БОТОВ, РЕКУРРЕНТНЫЕ СЕТИ

A.G. Kislaia, L.E. Chala, O.Y. Grynova. **Bot detection in social networks.** The analysis of types of social bots was performed, their influence on users was revealed. The signs by which it is possible to identify bots are described. The algorithms for the distribution of information by social networks are analyzed. A neural network architecture was proposed to identify bots, and the results of its work were provided for analyzing Twitter users and their tweets.

NEURAL NETWORK, BOTS, METHOD OF BOT DETECTION, RECURRENT NETWORKS

### Вступ

З розвитком інформаційних технологій з'являється все більше способів маніпуляції людською свідомістю. Існує безліч інструментів і різних платформ, але саме соціальні мережі стали головним плацдармом для подібних дій. Йдеться про поширення так званих соціальних ботів – спеціальних програм, створених для імітації поведінки людей в соціальних мережах. Призначення цих програм може бути різним, але найчастіше до їх використання вдаються інтернет-маркетологи і кіберзлочинці.

Соціальні боти – це напівавтоматичні або автоматичні програми, які використовують звичайні функції соціальних мереж (додавання контенту, реагування на чужий контент тощо). За допомогою мереж ботів - програм, які керують фейковими аккаунтами в соціальних мережах, можна штучно впливати на актуальність будь-якої теми.

Запрограмовані армії ботів реагують в соціальних мережах на пости з певними ключовими словами. Виявивши задане слово або хештег, вони генерують лайки, репости, залишають під постом заготовлені позитивні або негативні коментарі. Згідно з високою штучною активністю згенерованих матеріалів, алгоритми соцмереж виводять ботів у тренд і передають її іншим користувачам. Так вона стає популярною і автоматично виходить в топ найбільш обговорюваних. При цьому за трендами в Twitter, Instagram, Facebook тощо стежать рекламодавці, політики, журналісти, які намагаються зрозуміти, що цікавить інтернет-користувачів.

Маніпулювати трендами можна по-різному. Наприклад, владі якоїсь авторитарної країни не подобається популярний хештег, який використовують опозиціонери. В цьому разі за допомогою ботів вони розкручують в мережі альтернативну кампанію і витісняють початковий хештег з топа. У підсумку до нього менше звертають увагу, а потім і зовсім забувають.

Коли дві третини учасників спільноти є ботами, то ефективність, наприклад, торгових кампаній суттєво зменшується, адже боти нічого не купують та не цікавляться новинами. Більш того, фальшиві користувачі створюють непотрібний інформаційний шум, а також загрожують звичайним користувачам.

Блокувати ботів доцільно зі старту, при додаванні в друзі або після підписки на сторінку. Це визначає актуальність розпізнавання фейкових аккаунтів, для чого можуть бути ефективно використовувані нейронні мережі та методи машинного навчання.

Метою даної статті є аналіз можливості автоматичного виявлення ботів в популярних соціальних мережах за допомогою запропонованих нейромережних моделей.

### 1. Негативний вплив ботів на ефективність соціальних мереж

Мертві аккаунти в соцмережах дуже часто створюються для поширення спаму або збільшення рейтингу певним групам. Такі боти не загрожують групі і читачам.

Більш серйозні боти можуть публікувати тематичний контент і навіть починати дискусії в коментарях. Вони насправді загрожують інформаційній безпеці.

По-перше, боти можуть завалити стрічку новин рекламою. По-друге, вони часто поширюють нелегальний контент. По-третє, займаються шахрайством, наприклад, фішингом або зараженням комп'ютерів користувачів шкідливими програмами. По-четверте, боти часто використовуються для політичної пропаганди, збираючи інформацію про дії та вподобання користувачів.

Як не дивно, незважаючи на всю небезпеку ботів, SMM-менеджери часто самі звертаються до залучення мертвих аккаунтів. Втім штучно створена група з 10 тисячами читачів і сотнями записів не завжди сприяє просуванню бізнесу. Відсутність взаємодій з аудиторією не може допомогти такому просуванню та збільшити показники продажу товару.

У 2013 році боти атакували американське інформаційне агентство Associated Press. Зловмисникам вдалося поширити на сайті неправдиві повідомлення про атаку на Білий дім і пораненні Президента США Барака Обами. Ця новина швидко розійшлася і вплинула на американський фондовий ринок, при цьому деякі акції впали в ціні до критичних показників.

Дуже великою популярністю бот-атаки користуються в Росії. Тільки за 2016 рік там було зафіксовано більше тисячі атак на фінансові та політичні ресурси. Наприклад, online-обговорення «податку на інтернет» в Росії виявилось під загрозою зриву через бот-атаки. Було зафіксовано, що, починаючи з 20 квітня і до кінця обговорення, на сайт надходили виключно позитивні відгуки. Модератори сайту закрили коментарі на два дні і перевірили аккаунти. В ході розслідування були вилучені 3000 повідомлень від ботів.

Програмісти University of British Columbia провели цікавий експеримент, поширивши в мережі Facebook програму, що здатна самостійно зареєструвати аккаунт. При цьому боти вели себе в соціальній мережі, як звичайні користувачі, тобто обмінювалися фотографіями, статусами, коментували записи, шукали друзів.

Експериментатори помітили, що в друзі користувачі частіше додають невідомого, якщо бачать, що раніше його вже додали знайомі. Згоду на запити до друзів боти отримували в 60% випадків. Таким чином, боти завантажили 250 гігабайтів особистої інформації зі сторінок своїх нових друзів. Ініціатори експерименту запевняють, що вся зібрана ними інформація не отримала подальшого поширення і застосування. Дані були зашифровані, а згодом знищені.

Вивчає маніпуляції в соцмережах німецький політолог Симон Хегель (Simon Hegelich), який в 2014 році виявив мережу ботів, що впливали на тренди

в розпал конфлікту на Україні. 15 тисяч фейкових аккаунтів залишали по 60 тисяч постів в день: вони публікували жарти, обговорювали спортивні події і між справою підтримували «Правий сектор». С. Хегель підтвердив в інтерв'ю DW і те, що армії ботів були активні під час виборчої кампанії в США в 2016 році. Агітаційні повідомлення нібито розсилали привабливі дівчата, за якими насправді ховалися спеціальні програми [1].

## 2. Види і задачі ботів

Розглянемо 6 основних груп соціальних та пошукових роботів.

*Технічні боти.* В їх структурі практично завжди є спеціально прописані програми. Головними завданнями таких програм є накопичення лайків і односкладових коментарів під потрібним записом, створення великої маси друзів для збільшення довіри до боту і поширення публікацій через репости. Це найбільш популярний вид ботів, який використовується в будь-яких соціальних мережах (найчастіше це Facebook, ВКонтакте або Instagram).

*Бойові боти.* Потрібні в першу чергу для зниження репутації або блокування певної сторінки в соціальній мережі шляхом відправлення великої кількості скарг і негативних коментарів.

*Зливні боти.* Іноді для поширення тієї чи іншої інформації використовуються спеціальні боти, які спочатку поведуться як реальні користувачі, але в певний момент починають поширювати інсайдерську інформацію. Згодом багато інтернет-видань та ЗМІ будуть посилатися на ці фальшиві джерела.

*Гіперболізуючі боти.* Це, мабуть, найбільш тонкий і досвідчений вид соціальних ботів, які призначені для входження в довіру до клієнтів конкурента замовника з подальшим створенням антиреклами. З першого погляду фейковий користувач повністю підтримує ідеологію і погляди опонента. Але в певний момент починає поширювати гіперболізовану (перебільшену) інформацію. Наприклад, бот проникає в групу любителів певної марки автомобіля і повідомляє, що всі власники автомобілів інших підприємств є не мають смаку, а пізніше його підтримують інші боти. В результаті багато потенційних покупців почнуть вельми скептично ставитися до всіх власників даних автомобілів і відповідно до всього бренду в цілому.

*Інтелектуальні бойові боти.* Ці боти цікаві тим, що використовують власний вкладений інтелектуальний ресурс. Тобто програма з необхідними закладеними даними відправляється на інформаційну війну для пропаганди сторонньої думки. Головне завдання такого бота — спілкуватися на вузькоспеціалізовані теми або обговорювати певні гілки повідомлень. Крім цього, такий бот часто може переходити на образи чи провокаційні висловлювання щодо інших користувачів, тим самим відволікаючи уваги від основної теми бесіди. Цей

вид бота найбільш популярний при обговоренні політичних і соціальних явищ.

*Боти від сайтів.* До їх допомоги вдаються мало-відомі компанії, створюючи аккаунт на віртуальну особистість. Зазвичай такі боти малоактивні і їх легко виявити [2].

### 3. Загальні ознаки ботів

Існує безліч різних ознак, за якими можна розпізнати бота. Серед них є як очевидні, так і виявлені за допомогою тривалого аналізу даних.

На підробленій сторінці часто зображені дуже приваблива дівчина або хлопець. Люди схильні звертати увагу на привабливі фотографії, такі фотографії збільшують ймовірність того, що запит в друзі буде прийнятий. Щоб переконатися, що зображення реальне, потрібно виконати пошук в Google Image – якщо знайдеться безліч сайтів з цим зображенням, можна припустити, що обліковий запис є фальшивим.

Найчастіше боти не викладають велику кількість фотографій або новин на своїх сторінках (якщо це мережа на зразок Facebook). Їх головна мета – докласти найменшу кількість зусиль, щоб створити видимість того, що за сторінкою в соцмережі є дійсно реальна людина. Тому, якщо сторінка контролюється ботом, швидше за все на ній не викладають фотографій.

Якщо біографічна інформація надто дивна або явно вигадана, то є велика ймовірність того, що це підроблений аккаунт.

Боти часто можуть приймати запит в друзі, але не можуть відповідати на повідомлення (або їхні відповіді обмежені певним набором фраз). Якщо є сумніви, чи аккаунт є реальним, то йому можна надіслати повідомлення і зачекати на реакцію.

Деякі акаунти, контрольовані ботами, налаштовані на те, щоб «лайкати» певну кількість сторінок в день (воно може бути обмежене, щоб не потрапити під простий алгоритм пошуку ботів, тому боти можуть «лайкати» велику кількість сторінок в день, і на цьому будуть ідентифіковані).

Кількість друзів і читачів у фейкового аккаунта може бути більше тисячі, але більшість серед сумнівні або схожі на спамерських пошукових роботів.

Власний контент у ботів майже відсутній: бот не діляться спогадами, думками або ідеями. Для того, щоб сторінка не була порожньою і не виглядала підозрілою, дуже часто фейковий акаунти наповнюють її переписами.

### 4. Аналіз роботи алгоритмів соцмереж

В умовах постійно зростаючої кількості інформації соціальні мережі фільтрують її за допомогою різних методів.

Найпростіший спосіб вирішити, яку інформацію показувати користувачеві, а яку ні (або ж яку

інформацію показувати в першу чергу) – це лінійні моделі з ваговими коефіцієнтами, що у загальному випадку мають таку форму:

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i * x_i + \epsilon_i.$$

Алгоритм випадковим чином призначає ваги для різних властивостей інформації, а потім уточнює цю інформацію на кожному прикладі, для якого відомою є правильна відповідь – це навчання з учителем.

У випадку з записами в Facebook, про які алгоритму треба відповісти «показувати / НЕ показувати», є ще одне корисне джерело інформації – це слова, з яких складено запис. Якщо модель знає, що людина любить читати про ракети, Марс і Ілона Маска, то за кожне з цих слів видасть багато балів, і випадкові знайомі, справами яких він не цікавився останні п'ять років, мають шанс пробитися до нього у френд-стрічку зі своїми міркуваннями про запуск автомобіля в космос.

Відзначимо, що прості і швидкі алгоритми не реагують на інтонації і стилі записів. Так, вони не відрізняють віршів від прози, приховані цитати і сарказм є за межами їх розуміння, тому що для простої моделі запис є мішком слів (у фахівців з машинного навчання це усталений термін): слова або є, або немає, а в якому порядку йдуть і що означають разом, вже неважливо. Також прості лінійні моделі не вміють шукати сенс в комбінаціях ознак.

Ще один спосіб ранжування інформації – моделі вирішальних дерев:

$$\beta_v(x, j, t) = [x_j < t].$$

Приклад використання таких моделей – постановка діагнозу лікарем. Сценарії діалогу лікаря з хворим можна представити в формі гіллястого дерева: кожне наступне питання залежить від відповіді на попереднє. Такий алгоритм добре справляється з десятками і сотнями ознак, але далі починає зазнавати труднощів. Тексти, в яких присутні десятки тисяч різних слів, або багатопіксельні малюнки, таким алгоритмом обробити не можна. Така інформація піддається аналізу тільки в напів-обробленому вигляді, коли текст або малюнок уже перетворені в обмежений набір ознак. В такому разі набагато ефективнішим є використання нейронних мереж.

З точки зору математики кожний з окремих нейронів таких мереж є лінійною моделлю: він отримує електричні сигнали від інших нейронів, оцінює їх (в умовних балах) і видає сумарну оцінку у вигляді власного електричного сигналу.

Але один нейрон рідко приймає остаточне рішення: в мозку вони часто організовані в шари, і відповідь буде готовий, коли нервовий імпульс пройде їх все наскрізь, від верхніх до найглибших. Нейрони першого шару отримують «сирі» сигнали

- наприклад, вони можуть бути паличками або колбочками сітківки, які реагують на світло. Кожен нейрон другого шару буде обробляти імпульси від багатьох клітин першого і формувати свій електричний імпульс, щоб передати його далі.

Нейромережі можна довірити все відразу, тому що великим питанням потрібні великі обчислювальні потужності: «багатоповерхові» алгоритми вимагають більш громіздких розрахунків, ніж «одноповерхові». У листопаді 2016 року Google перемкнув на нейромережі свою систему машинного перекладу, але користувачі потребують перекладу текстів все-таки рідше, ніж оновлюють стрічку Facebook. У травні 2017 року на блозі компанії Twitter з'явилася новина, що тепер нейромережі беруть участь і в ранжуванні твітів (тобто вирішують, які показувати вище, а які нижче). Ключове слово тут «беруть участь»: вони як і раніше беруть на себе тільки частину роботи. Тому долю френд-стрічки як і раніше вирішують прості математичні моделі.

Використовуючи знання алгоритмів ранжування інформації, генератор соціальних ботів може вивести в тренд свою тему за допомогою простого програмування бота на відповідний чин поведінки.

## 5. Опис використовуваних даних

Розглянемо можливість використання нейромереж для виявлення ботів на прикладі даних соціальної мережі Twitter.

Аналіз проводився на двох рівнях: на рівні аккаунтів користувачів і на рівні їх твітів (рис.1, рис.2).



Рис. 1. Аккаунт в мережі Twitter

З аккаунтів користувачів використовувалися наступні дані:

- статуси;
- читачі;
- друзі;
- відношення до сторінок інших користувачів;
- опис профілю і його фото;
- геолокація;
- використання фону;
- верифікованість;
- захищеність.



Рис. 2. Приклад твіту

На рис. 2 представлений приклад твіта. Тіло твіта може складатися з тексту повідомлення (що включає в себе фото, відео, посилання), тегів, по яких потім можна шукати твіти, згадок інших користувачів мережі. Також твіт характеризується кількістю коментарів, ретвітів і лайками. Таким чином, в експерименті були використані наступні складові:

- кількість ретвітів;
- кількість коментарів;
- кількість лайків;
- кількість хештегів;
- кількість посилань;
- кількість згадок.

## 6. Опис архітектури нейромережі

Метадані користувачів є найкращим предиктором для виявлення ботів. Це дозволяє використовувати чимало існуючих стандартних методів машинного навчання в нейромережах для ідентифікації ботів.

Було виявлено, що більшість з цих методів є достатньо ефективною, причому більшість підходів перевершувало точність передбачення більш ніж 90%. Найуспішніший підхід полягав у використанні класифікатора Random Forest, що дає точність 95%. Однак спостерігався значний приріст продуктивності при балансуванні набору даних з використанням методів передискретизації, зокрема, методу передискретизації синтетичної меншини (SMOTE) [3].

Алгоритм SMOTE генерує семпли, засновані на просторі прикладів меншини (класу, який має меншу кількість помічених точок даних), і є потужним методом, який успішно використовується в багатьох доменах. Зокрема, була використана комбінація SMOTE і двох методів передискретизації. Такі методи поліпшення даних використовуються для усунення будь-якого зсуву, введеного за допомогою передискретизації. SMOTE був об'єднаний з поліпшенням даних через Edited Nearest Neighbors (ENN) [4] і Tomek Links [5]. Було виявлено, що ці дві комбінації дають цілком задовільні результати по незбалансованим даним. Хоча об'єднання SMOTE і субдискретизація через Tomek Links (SMOTOMEK) не покращує результати в значній мірі, значне поліпшення спостерігається завдяки об'єднанню SMOTE і субдискретизація через ENN (SMOTENN) для всіх моделей.

У випадку з аналізом твітів, щоб подолати обмеження традиційних методів нейронних мереж, була використана модель Long Short Term Memory

(LSTM) [6], що перевершує варіант рекурентних нейронних мереж (RNN) (рис. 3) [7]. RNN і їх варіації були визнані ефективними для задач НЛП, враховуючи їх здатність вивчати зв'язку в послідовних даних.

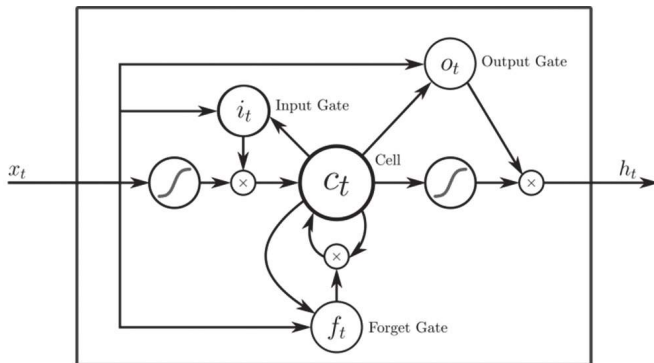


Рис. 3. Алгоритм LSTM

Для перетворення твітів у форму, придатну для LSTM, був використаний попередньо підготовлений набір глобальних векторів для подання слів (GloVE), призначений для даних Twitter [8]. GloVE – це глобальна лог-білінійна регресійна модель, яка використовує глобальну матричну факторизацію і методи локального контекстного вікна для ефективного вивчення субструктури природної мови шляхом навчання за випадковим збігом слів.

До навчання LSTM на твітах, твіти були оброблені шляхом формування рядка токенів з кожного твіту.

Хештеги, посилання і числа, згадані користувачем в повідомленні, були замінені на відповідні теги. Аналогічним чином, більшість поширених смайлів було замінено на теги, що відповідають цим емоціям.

Для слів, написаних великими літерами, або для слів, що містять більше 2 повторюваних букв, використовувався тег, що проставляється після появи слова. Всі маркери перетворені в нижній регістр.

В подальшому ці токенизовані твіти перетворюються у вхідну інформацію, використовуючи вищезгадану попередньо підготовлену модель GloVE. Результуюча формується виходить вектор з 32 ознаками, який надходить на вхід 2 активуючих ReLU шарів розмірностями 128 і 64 для отримання кінцевого результату. Модель скидає стан після кожної нової порції даних, тому навчальна послідовність виходить в рамках одного твіту, а не послідовності твітів.

Відзначимо, що такий підхід використовує тільки текстовий зміст твітів і не розглядає пов'язані з ним метадані. Використання метаданих не дозволяє точно визначити природу користувача, але метадані є слабкими предикторами характеру облікового запису (бот чи ні), тому їх доцільно також включити в мережу для більш точного аналізу.

В варіанті нейромережі з метаданими вводиться допоміжне введення даних в вихідний шар. Аналогічно раніше описаній моделі аналізу тільки твітів, головний вихід — це текст твіта, який є токенизованим і перетвореним в набір GloVE векторів перед обробкою їх LSTM. В результаті формується вектор, конкатенований з висновком, отриманим при обробці метаданих з двошаровою нейронною мережею, що використовує функцією активації ReLU. Отримані розмірності такі ж, як і в попередній моделі.

Як механізм регуляризації пропонується вихід метаданих, який також може надати можливість класифікації твітів. Втрата складається з зваженого середнього виводу метаданих та головного виведення в співвідношенні 2 до 8.

## 7. Опис експерименту

Для збору даних використовувалося Twitter API. Було зібрано близько 9 мільйонів твітів у восьми тисяч користувачів.

Незважаючи на те, що багато просунутих технік використовують велику кількість властивостей (1500 і більше), недавні дослідження показали, що досить використовувати обмежену, мінімальну кількість властивостей [9].

Лімітування кількості використовуваних властивостей пояснюється наступними причинами:

а) можливість інтерпретації. Обмежений набір властивостей зі зрозумілим значенням, на кшталт запропонованого в роботі, дозволяє продукувати інтерпретовані моделі. Це дуже важливий момент, особливо в комбінації зі стратегіями глибокого навчання, які, зазвичай, важко піддаються трактуванню;

б) ефективність моделі. Зменшений набір властивостей допомагає в отриманні ефективних моделей нейронних мереж, які потім можуть бути швидше натреновані і більш стійкі до перенавчання, що є досить поширеною проблемою в соціальних даних завдяки наявності великої кількості викидів.

Такий вибір кількості властивостей протиставлений системам, що використовують великий набір, які спроектовані для підтримки таких великих наборів, але обчислювальна ефективність яких неоптимальна, і можливість інтерпретації яких можна поставити під сумнів.

Для взаємодії з Twitter API була обрана бібліотека `hbc`, розроблена командою Твітетра, що працює з протоколом HTTP і взаємодіє з API безпосередньо за допомогою запитів.

Як бібліотека з реалізованою і кастомізованою нейромережею була обрана бібліотека `Deeplearning4j` - бібліотека програм на мові Java, що використовується як фреймворк для глибокого навчання.

Як БД обрана база MySQL (вільна реляційна система управління базами даних).

## 8. Аналіз отриманих результатів

Тестування нейромережі проводилося на виявлених заздалегідь 300 акаунтах ботів зі згаданих 8000 користувачів, а також на 500 акаунтах звичайних користувачів. Був проаналізований 1 мільйон твітів.

Класифікатор Random Forest показав точність 90%.; класифікатори SMOTE та з ENN з субдискретизацією (SMOTENN) показали точність близько 92.1%. Це говорить про те, що стратегія передискретизації синтетичного меншини дійсно ефективна при вирішенні таких завдань класифікації на рівні облікового запису. При підході, пов'язаному з передискретизацією за допомогою SMOTE, та субдискретизацією з ТОМЕК (SMOTOMEK), є менш ефективні, ніж при використанні ENN. В цілому, була продемонстрована можливість високоточного виявлення ботів на основі простих алгоритмів в поєднанні з синтетичними методами передискретизації меншини для поліпшення системи адаптації.

Використовуючи тільки твіти, система LSTM забезпечила точність класифікації 85.13%. Цей результат можна вважати перспективним: використання такої архітектури дає максимальну продуктивність в розмірі близько 5%, навіть використовуючи тексти твітів.

Контекстний LSTM показав підвищення продуктивності, що приводить до точності класифікації близько 89.42%. Варто відзначити, що різні конфігурації GloVe, а саме зміна розміру простору вкладення слова, не суттєво впливають на продуктивність: загальна тенденція вказує на те, що більш висока розмірність дає ненабагато кращу продуктивність. З проведеного аналізу можна зробити висновок, що, хоча метадані твітів є слабким предиктором, запропонована архітектура, що використовує додаткову інформацію, надану метаданими, дозволяє отримати більш точні результати прогнозування. Слід зазначити, що метадані не були передискретизовані для систем контекстного LSTM.

Глибокі моделі нейронних мереж часто описуються як неінтерпретовані «чорні ящики». Хоча вони дають вражаючі результати в багатьох практичних додатках, але вимагають уваги до питання інтерпретування. Перспективним є проведення досліджень внутрішнього стану рекурентних моделей з візуалізацією відповідної прихованої динаміки.

## Висновки

У статті були розглянуті види ботів, їх вплив на користувачів, а також способи виявлення ботів в соціальних мережах за допомогою нейронних моделей.

Сьогодні для маніпулювання громадською думкою в мережу постійно випускаються тисячі ботів, які вже здатні спілкуватися майже без участі людини. Комп'ютерні програми-боти здатні маніпулювати соціальними мережами і в більш широкому масштабі - наприклад, загострювати увагу на якихось громадських проблемах, підтримувати гуманітарні акції або, навпаки, пригнічувати соціальну активність.

Запропонований нейромережевий підхід дозволяє виявляти ботів в мережах типу Twitter на двох рівнях: на рівні профілів користувачів, а також на рівні твітів. Результати експериментів підтвердили, що обидва підходи забезпечують достатньо високу точність передбачення.

### Список літератури:

1. Dark side of SMM: чем опасны бот-аккаунты [Электронный ресурс] / М|С Today – Режим доступа: <https://mc.today/dark-side-of-smm-chem-opasny-bot-akkaunty/> – 2017. – Загл. с экрана.
2. Марголін О.Г. Система виявлення інформації у текстових повідомленнях користувачів / О.Г. Марголін // Штучний інтелект. – 2016. – № 4. – С. 85-91.
3. Chawla N. V. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique [Text] / N. V. Chawla, K. W. Bowyer, L. O. Hall // Journal of artificial intelligence research. – 2002. – Vol.16. – P. 321–357.
4. Dennis L. W. Asymptotic properties of nearest neighbor rules using edited data [Text] / L. W. Denis // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1972. – Vol 2, №3. – P. 408-421.
5. Tomek I. Two modifications of CNN [Text] / I. Tomek // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. – 1976. – Vol. 6 – P. 769–772.
6. Hochreiter S. Long short-term memory [Text] / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // Neural Computation. – 1997. – Vol. 9, №8. – P. 1735-1780.
7. Jozefowicz R. An empirical exploration of recurrent network architectures [Text] / R. Jozefowicz, W. Zaremba, I. Sutskever // In Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning (ICML-15). – 2015. – P. 2342–2350.
8. Samek W. Understanding, Visualizing and Interpreting Deep Learning Models [Text] / W. Samek, T. Wiegand, K-R. Müller // Explainable Artificial Intelligence. – 2017. – №. 1708.08296.
9. Ferrara E. The rise of social bots [Text] / E. Ferrara, O. Varol, C. Davis // Commun. ACM. – 2016. – Vol. 59, №7. – P. 96-104.

Надійшла до редколегії 11.04.2018





**К.Э. Петров<sup>1</sup>, И.В. Кобзев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ХНУРЭ, г. Харьков, Украина, kostiantyn.petrov@nure.ua

<sup>2</sup>ХарПИ НАГУ при Президенте Украины, г. Харьков, Украина, ikobzev12@gmail.com

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ ДЕЙСТВИЙ**

Предложен подход к определению предпочтений пользователей, который базируется на синтезированной модели выбора. Решена задача структурной и параметрической идентификации этой модели на основе идей теории компараторной идентификации. Данный подход дает возможность прогнозировать оценки пользователей для объектов определенной категории, что позволяет повысить релевантность выдачи рекомендаций. Приведены результаты численного моделирования, подтверждающие эффективность описанного подхода.

**РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, МОДЕЛЬ ВЫБОРА, МЕТОД КОМПАРАТОРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ, ФУНКЦИЯ ПОЛЕЗНОСТИ**

**К.Е. Петров, І.В. Кобзев. Прогнозування переваг користувачів на базі аналізу їх дій.** Запропоновано підхід до визначення переваг користувачів, який базується на синтезованій моделі вибору. Розв'язано задачу структурної та параметричної ідентифікації цієї моделі на основі ідей теорії компараторної ідентифікації. Цей підхід дає можливість прогнозувати оцінки користувачів для об'єктів певної категорії, що дозволяє підвищити релевантність видачі рекомендацій. Наведено результати чисельного моделювання, що підтверджують ефективність описаного підходу.

**РЕКОМЕНДАЦІЙНІ СИСТЕМИ, МОДЕЛЬ ВИБОРУ, МЕТОД КОМПАРАТОРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ, ФУНКЦІЯ КОРИСНОСТІ**

**K.E. Petrov, I.V. Kobzev. Forecasting preferences of users based on the analysis of their actions.** In the article suggests an approach to determining user's preferences, which is based on the synthesized model of choice. The problem of structural and parametric identification of this model is solved on the basis of the ideas of the theory of comparative identification. This approach give opportunity it possible to predict user's estimates for objects of a certain category, which makes it possible to increase the relevance of issuing recommendations. The results of numerical modeling confirming the effectiveness of the described approach are presented.

**RECOMMENDER SYSTEMS, MODEL OF SELECTION, METHOD OF COMPARATIVE IDENTIFICATION, UTILITY FUNCTION**

### **Введение**

Рекомендательные системы настолько прочно вошли в нашу жизнь, что мы зачастую даже не осознаем на сколько велико их влияние на наш выбор. Они активно используются в электронной коммерции, поисковых системах, социальных сетях, новостных сервисах, он-лайн кинотеатрах и библиотеках, т. е. фактически везде для персонализации контента, таргетирования рекламы, маркетинга и т. п.

Рекомендательные системы — это большой класс моделей и алгоритмов, относящихся к машинному обучению, которые пытаются предсказать какие объекты (товары, контент) будут интересны пользователю, на основе имеющейся определенной информации о его профиле (личных данных, интересах, истории просмотров, оценок и т. п.). Фактически эти системы прогнозируют предпочтения пользователей.

Для адекватной работы рекомендательных систем необходимо каким-то образом собирать данные о пользователях. Для этого используют сочетание явных (например, создание личного кабинета, запрос у пользователя оценки объекта по некоторой шкале и т. п.) и неявных (например, слежение за тем, что просматривает пользователь

в интернет-магазине, что положил в корзину или купил) методов.

Можно условно выделить четыре типа рекомендательных систем [1].

1. Коллаборативная фильтрация (collaborative filtering) [2, 3]. Рекомендации основываются на поведенческих характеристиках (оценках) одного человека или группы людей, которые похожи между собой. Например, пользователю, со схожими с вашими оценками, понравился данный фильм, вероятно вам он тоже понравится. Этот тип систем обладает теоретически высокой точностью, однако релевантные рекомендации возможны только в том случае если известна хоть какая-то информация об интересах пользователя.

2. Основанные на контенте (content-based) [2, 3]. Здесь выдача рекомендаций осуществляется на основе данных, собранных о каждом конкретном объекте. Пользователю рекомендуются объекты, похожие на те, которыми он ранее интересовался (например, книги того же жанра или автора). К достоинствам таких систем можно отнести возможность рекомендовать даже те объекты, которые не были оценены другими пользователями или давать рекомендации новым пользователям, тем самым вовлекая их в сервис. Для этого не нужно долго

собирают данные о их предпочтениях. Основные недостатки — зависимость от предметной области, снижение точности, а также увеличение времени разработки таких систем.

3. Основанные на знаниях (knowledge-based) о предметной области [2, 3], а не о каждом объекте. Эти дополнительные знания позволяют выдавать рекомендации основываясь не просто на «похожести» чего-либо, а с более сложными условиями. Например, к этому телефону вам возможно понадобится чехол или защитное стекло. Такой тип рекомендаций имеет высокую точность, предлагая пользователю то, что ему нужно. Однако минусом таких систем является высокая сложность разработки и сбора данных, в частности из-за необходимости изучения и анализа взаимосвязей между объектами.

4. Гибридные (hybrid) рекомендательные системы [1, 2, 3] основаны на комбинировании коллаборативных и контентных подходов, что позволяет избежать большинства недостатков, которые проявляются при использовании каждого из методов по отдельности. Например, самая технологичная на текущий момент система Netflix (BellKor) является комбинацией 27 рекомендательных алгоритмов. Главным минусом таких систем является самая высокая сложность их разработки.

Из анализа литературных источников [1, 2, 3] и многих других можно сделать вывод, что все реально работающие рекомендательные системы являются гибридными.

Общими проблемами, которые присущи всем типам рассмотренных выше систем являются: во-первых, так называемая проблема «холодного старта», когда новым или нетипичным пользователям (которых нельзя отнести ни к одной определенной группе) сложно дать рекомендации и когда новые объекты (которые еще никем не оценены) не попадают в списки рекомендаций; во-вторых, частая банальность, обыденность рекомендаций, что снижает доверие пользователей к целесообразности следовать им.

Системы, которые способны выдавать релевантные рекомендации сокращают время, необходимое для поиска различных объектов и услуг, и значительно увеличивают вероятность попадания в поле зрения пользователя других объектов, которые смогут его заинтересовать. И как результат повышают лояльность и удовлетворенность пользователей веб-сервисами. Это в свою очередь приводит к увеличению потребления и росту прибыли, а также увеличивает частоту посещений веб-ресурсов постоянными пользователями и уменьшает отток клиентов. Поэтому разработка новых методов и алгоритмов повышающих эффективность использования такого рода систем является весьма актуальной.

## 1. Постановка задачи

Основной проблемой выдачи пользователю релевантных рекомендаций является отсутствие информации о нем. Ведь не секрет, что получение информации о пользователе на основе явных методов является крайне проблематичным. Пользователь с большим нежеланием проходит регистрацию на сайте, выставляет оценки, формулирует мнения об объектах, заполняет анкеты и т. п. Неявные же методы позволяют получить очень поверхностную информацию. Например, по IP-адресу можно получить информацию о его местоположении, а по просмотрам категорий товара или контента — о его поле и приблизительном возрасте и т. д. В этом случае применение, например, метода коллаборативной фильтрации крайне затруднено из-за малого объема информации о пользователе.

Без потери общности рассмотрим подход к получению информации о предпочтениях пользователя в рамках анализа его поведения при выборе товара в интернет-магазине. Ведь зная его предпочтения и интересы мы можем существенно повысить релевантность рекомендаций.

Пусть потребителю (новому пользователю) предлагается некоторое ограниченное множество товаров различных марок одинакового функционального назначения (например, мобильные телефоны)  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . Каждый товар из этой определенной категории может быть описан набором разнородных частных характеристик  $K(x_i) = \langle k_1(x_i), k_2(x_i), \dots, k_m(x_i) \rangle$ ,  $i = 1, n$ . Эти характеристики достаточно полно отражают качество, надежность, функциональные свойства, безопасность, экономичность и т. п. предлагаемого товара и, кроме того, допускают их объективное количественное измерение.

Необходимо определить предпочтения потребителя на основе анализа только информации о его действиях на сайте конкретного интернет-магазина и базируясь на этих данных построить модель выбора потребителем товаров данной категории и идентифицировать её параметры.

При этом под моделью выбора будем подразумевать математическую модель, определяющую его выбор той или иной марки товара из рассматриваемой категории  $X$ .

Используя эту модель можно будет предсказать оценки товаров, которые пользователь не рассматривал (или новых товаров) и выдавать ему конкретные рекомендации.

## 2. Структурная и параметрическая идентификация математической модели выбора

Согласно теории поведения потребителей [3], каждой марке товара  $x_i \in X$ ,  $i = 1, n$  можно сопоставить некоторую обобщенную оценку "полезности" для потребителя. В общем виде такую обобщенную оценку, формально, можно выразить

в виде некоторой функции полезности  $P(x_i)$ , которая зависит от частных характеристик товара  $K(x_i)$  следующим образом:

$$P(x_i) = F[W, K(x_i)], \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $W = \langle w_1, w_2, \dots, w_s \rangle$  – кортеж параметров (коэффициенты относительной важности частных характеристик и их комплексов).

Предположим, что потребитель выбирает ”самый полезный” товар из данной категории не объясняя причин своего выбора. Таким образом, потребитель из всех возможных альтернатив  $x_i \in X$ ,  $i = \overline{1, n}$  выбирает товар  $x^0 \in X$  с максимальным значением функции полезности, т. е.

$$x^0 = \arg \max_{x_i \in X} P(x_i). \quad (2)$$

На основе только этой информации необходимо определить важность для потребителя тех или иных частных характеристик товара и их комплексов (т. е. их относительных ”весовых коэффициентов”  $W$ ).

Функция полезности (1) и критерий выбора (2) полностью определяют математическую модель выбора.

Следующим этапом является решение задачи ее структурной (выбор и обоснование вида функции  $F[\dots]$ ) и параметрической (определение значений ее параметров  $W$ ) идентификации.

Как показано в работе [4] в качестве функции  $F[\dots]$  целесообразно выбрать полином Колмогорова-Габора или некоторый его фрагмент. Главным его достоинством является, то что с его помощью можно реализовать как простейшие аддитивные и мультипликативные принципы формирования функций обобщенной полезности, так и более сложные линейные и нелинейные аддитивно-мультипликативные. Это бывает необходимо в случае рассмотрения не только отдельных частных характеристик альтернатив, но и их комплексов.

В нашем случае, будем в качестве функции полезности  $P(x_i)$  будем использовать фрагмент полинома, который представляет собой аддитивную функцию. Это является оправданным из-за небольшого объема информации полученной в ходе наблюдения за поведением потребителя при выборе товара. Однако это не исключает использования более сложных моделей [4] с членами второго, третьего и более высоких порядков, учитывающих взаимовлияние частных характеристик, в случае, если удастся получить больше информации от покупателей (при использовании явных методов).

Таким образом, модель обобщенной многофакторной оценки  $P(x_i)$  некоторой марки товара  $x_i \in X$ ,  $i = \overline{1, n}$  можно записать в виде:

$$P(x_i) = \sum_{j=1}^m w_j k_j^H(x_i), \quad (3)$$

где  $K^H(x_i) = \langle k_1^H(x_i), k_2^H(x_i), \dots, k_m^H(x_i) \rangle$  – нормированные значения частных характеристик товара;  $w_j$  – безразмерные коэффициенты относительной важности нормированных частных характеристик  $k_j^H(x_i)$ , которые удовлетворяют условиям

$$w_j \in [0, 1], \quad j = \overline{1, m}; \quad \sum_{j=1}^m w_j = 1. \quad (4)$$

Необходимость нормирования частных характеристик обусловлена тем, что в общем случае, они имеют различные размерность, интервал изменений и направление доминирования. Это нормирование производится следующим образом:

$$k_j^H(x_i) = \frac{k_j(x_i) - k_j^-(x_i)}{k_j^+(x_i) - k_j^-(x_i)}, \quad j = \overline{1, m}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где  $k_j(x_i)$  – действительное (абсолютное),  $k_j^-(x_i)$  – ”наихудшее”,  $k_j^+(x_i)$  – ”наилучшее” значения  $j$ -й частной характеристики.

Рассмотрим этап параметрической идентификации модели формирования многофакторной скалярной оценки ”полезности” товара (3).

На этом этапе нам необходимо формализовать информацию, полученную в ходе наблюдения за поведением пользователя.

Рассмотрим поведение пользователя в интернет-магазине в процессе выбора им товара определенной категории.

В данной ситуации, мы можем зафиксировать поведение потребителя, которое может проявиться в: 1) просмотре (можно зафиксировать время затраченное пользователем на анализ характеристик определенного товара); 2) отборе понравившихся товаров (помещение товаров в «корзину»); 3) покупке одной из марок товаров. В принципе, каждое из этих действий можно условно рассматривать как реализацию процесса выбора этим пользователем.

Полученную информацию невозможно перевести в числовую форму, так как у нас нет даже каких-либо оценок пользователей. Таким образом мы имеем количественные данные (характеристики товара  $K^H(x_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$ ) на «входе» модели оценивания и качественную информацию (поведение пользователя) на «выходе». Поэтому применение классического метода параметрической идентификации математической модели (3) здесь невозможно и необходимо разработать принципиально новый подход к решению этой задачи. В качестве основы такого подхода предлагается использовать метод компараторной идентификации [4].

Рассмотрим способы реализации этого подхода. Пусть на основе интроспективного анализа множества объектов данной категории  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

пользователь реализовал одно из действий (поведений) описанных выше (например, выбрал товар  $x_v \in X$ ). В соответствии с основными постулатами теории полезности и принятой гипотезе процесса выбора (2) можно записать, что

$$x_v \succ x_i \Leftrightarrow P(x_v) > P(x_i), \forall i = \overline{1, n}, v \in I_n, i \neq v \quad (6)$$

или

$$P(x_v) - P(x_i) > 0, \forall i = \overline{1, n}, v \in I_n, i \neq v. \quad (7)$$

Таким образом, получаем систему из  $n-1$  линейных неравенств.

Следует заметить, что если на множестве альтернатив  $X$  установлены отношения полного или частичного порядка, то это обстоятельство легко формализуется путем добавления соответствующих ограничений в систему (7). Например, если предпочтения пользователя выглядят так:  $x_1 \succ x_2 \sim x_3 \succ x_4$ , то можно записать согласно (6), что  $P(x_1) > P(x_2)$ ,  $P(x_2) = P(x_3)$  и  $P(x_3) > P(x_4)$ .

Система неравенств (7) определяет выпуклый многогранник на гиперплоскости

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1.$$

Любая точка  $(w_1, w_2, \dots, w_m)$ , удовлетворяющая этой системе является решением задачи. Это означает, что задача идентификации параметров модели (2), (3) является некорректной по Тихонову (т. е. в общем случае, не имеет единственного решения). Для ее регуляризации примем в качестве единственного решения чебышевскую [5] или среднюю точки [4]. Нахождение решения этими методами сводится к решению задачи линейного программирования (ЛП) [4, 5], что не вызывает принципиальных трудностей. Единственное преобразование, которое необходимо сделать для этого — в системе линейных ограничений (7) заменить все знаки «>» на « $\geq$ » и добавить условия (4). Так как чебышевская точка является точкой, которая равноуклонена от граней области допустимых решений (ОДР) образуемой (4) и (7), т. е. решение «центрируется» относительно граней, а средняя точка представляет собой решение «центрированное» относительно вершин ОДР,

то изменение знаков ограничений в (7) является чисто техническим приемом для сведения исходной задачи к задаче ЛП.

Экспериментальная проверка показала, что данные решения обладают высокой устойчивостью и имеют близкие к реальным значения [4].

Таким образом, в результате решения задачи параметрической идентификации модели выбора мы получим относительные весовые коэффициенты  $(w_1, w_2, \dots, w_m)$  важности для потребителя конкретных характеристик товаров из данной категории. Используя эти значения мы можем вычислить значения скалярных оценок  $P(x_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$  для всех товаров этой категории по формуле (3), а затем ранжировать их на основе этих оценок в порядке убывания их «полезности» для потребителя, что даст возможность повысить релевантность выдачи рекомендаций.

### 3. Иллюстративный пример

Пусть в интернет-магазине имеется семь марок биноклей, т. е.  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_7\}$  (табл. 1), из которых пользователь просмотрел только четыре. Наблюдая за поведением пользователя мы получили следующую информацию: отложил в «корзину» —  $x_3$ ; просматривал характеристики  $x_2$  (90 сек),  $x_5$  (60 сек) и  $x_6$  (30 сек). Предположим, что время просмотра характеристик биноклей определяет «интерес» пользователя к ним. Таким образом, его предпочтения могут быть представлены так:

$$x_3 \succ x_2 \succ x_5 \succ x_6. \quad (8)$$

На основе этой информации необходимо предсказать «ценность» (полезность) для пользователя марок биноклей  $x_1$ ,  $x_4$  и  $x_7$ , которые он не рассматривал. Эти предсказанные оценки послужат основанием выдачи рекомендаций пользователю в порядке убывания их «ценности» для него.

Пусть каждый бинокль описывается семью частными характеристиками (табл. 1.), которые определены на основании общих рекомендаций по их выбору. Эти характеристики

Таблица 1

Характеристики марок биноклей

$x_i$	Марка бинокля	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$
$x_1$	Alpen Shasta Ridge 8.5x50	8.5	50	0.85	5700	5.90	4.0	98
$x_2$	Alpen Shasta Ridge 10x50	10.0	50	0.85	6100	5.00	4.0	94
$x_3$	Arsenal 12x50 Porro	12.0	50	0.95	4500	4.16	5.0	95
$x_4$	Barska X-Trail 30x80	30.0	80	2.28	5200	2.67	3.7	25
$x_5$	Bresser Spezial-Saturn 20x60	20.0	60	1.14	4500	3.00	9.0	52
$x_6$	Nikon Action EX 12x50 CF	12.0	50	1.00	7200	4.20	7.0	96
$x_7$	Nikon Prostaff 5 10x42	10.0	42	0.63	7000	4.20	5.0	98

Таблица 2

Нормированные характеристики биноклей

	$k_1^H(x_i)$	$k_2^H(x_i)$	$k_3^H(x_i)$	$k_4^H(x_i)$	$k_5^H(x_i)$	$k_6^H(x_i)$	$k_7^H(x_i)$	$P(x_i)$
$w_i$	0.102	0.102	0.102	0.256	0.102	0.141	0.195	---
$x_1$	0.00	0.21	0.87	0.56	1.00	0.94	1.00	0.683
$x_2$	0.07	0.21	0.87	0.41	0.72	0.94	0.95	0.613
$x_3$	0.16	0.21	0.81	1.00	0.46	0.75	0.96	0.716
$x_4$	1.00	1.00	0.00	0.74	0.00	1.00	0.00	0.534
$x_5$	0.53	0.47	0.69	1.00	0.10	0.00	0.37	0.511
$x_6$	0.16	0.21	0.78	0.00	0.47	0.38	0.97	0.408
$x_7$	0.07	0.00	1.00	0.07	0.47	0.75	1.00	0.476

следующие: — кратность увеличения определяет, насколько «ближе» к нам окажется наблюдаемый объект (в разгах — чем больше, тем лучше);  $k_4(x_i)$  — цена бинокля (в грн. — чем меньше, тем лучше);  $k_5(x_i)$  — диаметр выходного зрачка определяет диаметр светового пучка, который попадает из бинокля в зрачок наблюдателя (в мм. — чем больше, тем лучше);  $k_6(x_i)$  — минимальная дистанция фокусировки (в м. — чем меньше, тем лучше);  $k_7(x_i)$  — ширина поля зрения на 1000 м. (в м. — чем больше, тем лучше).

Нормированные по формуле (5) характеристики биноклей представлены в табл. 2. В соответствии с информацией о предпочтениях потребителя (8) и принципом (6), а также с учетом формулы (3) и условий (4), система ограничений задачи может быть записана в следующем образом:

$$\begin{aligned}
 P(x_3) - P(x_2) &\geq 0, \\
 P(x_2) - P(x_5) &\geq 0, \\
 P(x_5) - P(x_6) &\geq 0, \\
 w_j &\geq 0, \quad j = \overline{1,7};
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

$$\sum_{j=1}^7 w_j = 1.$$

В результате вычисления чебышевской точки для системы линейных ограничений (9) получим значения весовых коэффициентов характеристик биноклей (строка  $w_i$ ) и функций их полезности (столбец  $P(x_i)$ ), которые представлены в табл. 2. Заметим, что все значения  $P(x_i)$ ,  $i = \overline{1,7}$  определяются по формуле (3). Таким образом, выдача рекомендаций пользователю осуществляется в порядке убывания полученных значений относительных оценок  $P(x_i)$  и будет выглядеть так:  $x_1$  ( $P(x_1)=0.683$ ),  $x_4$  ( $P(x_4)=0.534$ ) и  $x_7$  ( $P(x_7)=0.476$ ) (см. табл. 2).

**Выводы**

Предложенный в работе подход может быть использован в качестве составной части при создании гибридной рекомендательной системы наряду с применением подхода основанного на контенте (content-based), основной идеей которого является выдача «близких» (например, с точки зрения расстояния Евклида) к выбранным пользователем объектов. Главным преимуществом подхода является применение неявных методов для получения информации о предпочтениях пользователя. Он позволяет частично решить проблему «холодного старта» присущей любому типу рекомендательных систем. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность применения предложенного подхода.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку методов сегментации пользователей на основе полученных многофакторных оценок объектов и любой иной дополнительной информации о них.

**Список литературы:**

1. Рекомендательные системы / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://vas3k.ru/blog/355/>
2. Jannach D., Zanker M., Felfernig A., Friedrich G. Recommender Systems. An Introduction. — New York: Cambridge University Press, 2011. — 352 P.
3. Ricci F., Rokach L., Shapira B., Kantor P. B. Recommender Systems Handbook. — Springer, 2011 — 845 p.
4. Петров К.Э., Крючковский В. В. Компараторная структурно-параметрическая идентификация моделей скалярного многофакторного оценивания. — Херсон: Олди-плюс, 2009. — 294 с.
5. Зуховицкий С.И., Авдеева Л.И. Линейное и выпуклое программирование. — М.: Наука, 1967. — 460 с.

Поступила в редколлегию 12.02.2018

УДК 004.852



А.А. Бессонов

ХНЭУ им. С. Кузнеца, г. Харьков, Украина, oleksandr.bezsonov@hneu.net

## СОСТАВЛЕНИЕ РАСПИСАНИЯ СПОРТИВНЫХ ТРЕНИРОВОК С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Статья посвящена разработке программного обеспечения на основе генетических алгоритмов (ГА), которое осуществляет планирование теннисных тренировок с участием игроков различного пола, возраста и опыта. Выбор ГА обусловлен тем, что данные алгоритмы хорошо зарекомендовали себя при решении подобных задач планирования, являются достаточно исследованными, обладают высоким быстродействием и обеспечивают получение решений, близких к оптимальным. Приводятся результаты работы разработанного приложения, подтверждающие эффективность предложенных алгоритмов составления расписания.

РАСПИСАНИЕ ТРЕНИРОВОК, ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ, ФИТНЕС-ФУНКЦИЯ, СКРЕЩИВАНИЕ, МУТАЦИЯ

**Безсонов О.О.** Складання розкладу спортивних тренувань за допомогою генетичних алгоритмів. Стаття присвячена розробці програмного забезпечення на основі генетичних алгоритмів (ГА), яке здійснює планування тенісних тренувань за участі гравців різної статі, віку і досвіду. Вибір ГА обумовлений тим, що дані алгоритми добре зарекомендували себе при вирішенні подібних завдань планування, є досить дослідженими, мають високу швидкість і забезпечують отримання рішень, близьких до оптимальних. Наводяться результати роботи розробленого додатка, що підтверджують ефективність запропонованих алгоритмів складання розкладу.

РОЗКЛАД ТРЕНУВАНЬ, ГЕНЕТИЧНИЙ АЛГОРИТМ, ФІТНЕС-ФУНКЦІЯ, СХРЕЩУВАННЯ, МУТАЦІЯ

**Bezsonov O.O.** Sports training scheduling using genetic algorithms. The article is devoted to the development of software application based on genetic algorithms (GA), which performs the scheduling of tennis trainings with the participation of players of different sex, age and experience. The choice of GA is due to the fact that these algorithms have proven themselves in solving such scheduling problems. GA are sufficiently researched, have high speed and provide solutions that are close to optimal. The presented simulation results confirm the effectiveness of the proposed algorithms for scheduling.

TRAINING SCHEDULE, GENETIC ALGORITHM, FITNESS FUNCTION, CROSSING, MUTATION

### Введение

Многие практические и теоретические проблемы оптимизации характеризуются многомерностью пространства поиска. Эти проблемы включают в себя NP-полные задачи комбинаторной оптимизации, идентификации сложных структур или многомерной оптимизации функций и т.д. Наиболее часто такие проблемы возникают в области планирования.

Планирование – одна из многих широко изученных и исследованных практических задач в комбинаторной оптимизации. Планирование состоит из разработки расписания некоторых событий в пределах заданного временного интервала и предоставления конечного набора ресурсов таким образом, чтобы данные события не конфликтовали друг с другом и не нарушали при этом заданных ограничений. Проблемы с составлением расписания возникают во многих областях, таких как планирование заданий на производстве, планирование дежурств в больнице, планирование процессов в компьютерной системе, планирование выпускных экзаменов в школе или университете. В большинстве случаев задачи планирования не имеют известного алгоритма решения полиномиальной

сложности, способного найти решение, которое оптимально сочетает данные ресурсы без нарушения ограничений. Пространство поиска, состоящее из всех комбинаций событий, времени и местоположений, может быть слишком большим для тщательного поиска в разумные сроки. Во многих реальных приложениях планирования эта работа выполняется вручную экспертами, использующими многолетний опыт для нахождения близких к оптимальным или наиболее благоприятных решений. Этот процесс занимает значительное время и конечный результат обычно далек от желаемого. Чтобы устранить неэффективную практику ручного планирования, исследователи пытались автоматизировать данную задачу с использованием вычислительной техники, которая теоретически позволяет сгенерировать расписание за значительно меньшее время, чем человек. Однако, как и во многих других случаях, связанных с эвристикой, кодирование человеческого знания в компьютеризированной форме оказалось довольно сложной задачей. Тем не менее, с целью автоматизации сложных задач планирования были исследованы различные методы, результаты которых показали, что применение традиционных методов, таких как

градиентные, динамическое программирование, симплекс-метод для решения этой задачи часто не дает желаемого результата, так как вычислительные затраты растут экспоненциально вместе с размерностью задачи. В связи с этим довольно часто для решения практических задач применяются эвристические методы с гораздо более низкими вычислительными затратами, несмотря на то, что они могут и не обеспечивать достижения глобального оптимального решения.

Около трех десятилетий назад в литературе начали обсуждать заимствованные у природы эвристические методы, которые оказались более гибкими и эффективными. К таким методам оптимизации относят метод имитации отжига, который проводит аналогию между отжигом материала до его самого низкого энергетического состояния и решением задачи оптимизации, эволюционные алгоритмы (ЭА), в основном заимствованные из биологической эволюции. Такие современные подходы, как табу поиск, муравьиные алгоритмы, метод роя частиц также упоминаются в контексте заимствованных у природы методов оптимизации. В последнее время получает все большее значение в области эвристической оптимизации теория агентов [1]. В данной работе основное внимание уделяется такому разделу эволюционных вычислений, как генетические алгоритмы (ГА), с помощью которых осуществляется планирование теннисных тренировок между игроками различного пола, возраста и опыта. Выбор ГА обусловлен тем, что данные алгоритмы хорошо зарекомендовали себя при решении подобных задач планирования, являются достаточно исследованными, обладают высоким быстродействием и обеспечивают получение решений, близких к оптимальным.

### 1. Генетические алгоритмы

ГА являются методом машинного обучения, использующим механизмы отбора в природе [2], осуществляющие случайный и параллельный поиск решений, которые оптимизируют заранее определенную фитнес функцию [3]. ГА были впервые предложены в Мичиганском университете американским исследователем Дж. Холландом [4-5] для решения задач оптимизации в качестве достаточно эффективного механизма комбинаторного перебора вариантов решения. В отличие от многих других работ, целью Холланда было не только решение конкретных задач, но и исследование явления адаптации в биологических системах и применение его в вычислительных системах. При этом потенциальное решение (особь) представляется хромосомой – двоичным кодом. Популяция содержит множество особей. В процессе эволюции используются три основных генетических оператора: репродукция, кроссинговер и мутация. Голдберг

(ученик Холланда) успешно развил ГА и расширил области их применения. Его монография [6], в которой систематически изложены основные результаты и области практического применения ГА, является в настоящее время наиболее известной и цитируемой.

Основываясь на идеях Холланда, была принята концепция стандартного генетического алгоритма (SGA), на которую сильно повлиял его биологический архетип [7]. В связи со значительным ростом вычислительной мощности с 1975 года, потенциал ГА увеличивается все больше и больше. В связи с этим популярность ГА-концепций неуклонно растет, и многие ученые по всему миру стали решать различные проблемы науки и техники с помощью ГА. Однако вскоре стало очевидным, что для большинства практических задач двоичное кодирование, первоначально предложенное Холландом, вовсе не является достаточным. В связи с этим были разработаны различные варианты кодировки информации, а также новые операторы скрещивания и мутации, применение которых весьма разнообразило поведение проектируемых на основе ГА приложений. Обзор различных кодировок и операторов, разработанных для различных приложений, может быть найден в [8]. С тех пор ГА были успешно использованы для решения широкого круга задач, включая многие комбинаторные задачи оптимизации, оптимизацию многомерных функций, машинное обучение и эволюцию сложных структур, таких как нейронные сети. В работах [6, 9] Голдбергом и Михаливичем дается обзор ГА и приложений на их основе в различных сферах.

В природе генетическая информация определяется четверичным кодом, основанном на четырех нуклеотидах: аденине, цитозине, гуанине и тимине, соединенных вместе в последовательность ДНК, которая лежит в основе генетического кода [10]. При переносе этой структуры в информатику, кажется естественным основывать все кодирование на двоичном коде, общепринятом в компьютерных науках. То есть используются хромосомы, которые являются двоичными строками, кодирующими решения поставленных задач, и именно это является отличительной чертой генетических алгоритмов [11]. ГА выполняет глобальный поиск в пространстве решений, которое состоит из векторов данных. Первым шагом алгоритма является инициализация пространства решений случайно сгенерированными значениями. На каждой итерации, доступные решения мутируют или скрещиваются с другими решениями для того, чтобы создавать новые решения. В конце каждой итерации, каждый индивидуум (решение-кандидат) оценивается с использованием заданной фитнес-функции. Таким образом, фитнес-функция – ключевая часть каждого эволюционного алгоритма, и

предназначена для поиска того решения, которое является наилучшим для данной задачи. После того, как каждая особь была оценена, наименее пригодные кандидаты отклоняются, при этом остаются только лучшие из доступных решений в популяции. Цикл итераций повторяется до тех пор, пока предопределенный критерий останова не будет достигнут. В качестве критерия останова может использоваться либо число итераций, либо условие прохождения определенного порога значения фитнес-функции, которое должно быть достигнуто в пространстве решений. Более подробная информация по ГА может быть найдена в [6], [12], [13].

Рассмотрим, прежде всего, классический генетический алгоритм, являющийся базовым для эволюционных методов оптимизации. ГА используют принципы и терминологию, заимствованные у биологической науки – генетики. В ГА каждая особь представляет потенциальное решение некоторой проблемы. В классическом ГА особь кодируется строкой двоичных символов – хромосомой, каждый бит которой называется геном. Множество особей – потенциальных решений составляет популяцию. Поиск (суб)оптимального решения проблемы осуществляется в процессе эволюции популяции – последовательного преобразования одного конечного множества решений в другое с помощью генетических операторов репродукции, кроссинговера и мутации.

Генетические алгоритмы – не просто случайный поиск, они эффективно используют информацию, накопленную в процессе эволюции. ГА берет множество параметров оптимизационной проблемы и кодирует их последовательностями конечной длины в некотором конечном алфавите (в простейшем случае двоичный алфавит «0» и «1»). ГА работает до тех пор, пока не будет выполнено заданное количество поколений (итераций) процесса эволюции или на некоторой генерации будет получено заданное качество, или вследствие преждевременной сходимости при попадании в некоторый локальный оптимум.

В каждом поколении множество искусственных особей создается с использованием старых и добавлением новых с хорошими свойствами. В процессе поиска решения необходимо соблюдать баланс между «эксплуатацией» полученных на текущий момент лучших решений и расширением пространства поиска. Различные методы поиска решают эту проблему по-разному. Например, градиентные методы практически основаны только на использовании лучших текущих решений, что повышает скорость сходимости с одной стороны, но порождает проблему локальных экстремумов с другой стороны. В полярном подходе случайные методы поиска используют все пространство поиска,

но имеют низкую скорость сходимости. В ГА принята попытка объединить преимущества этих двух противоположных подходов. При этом операторы репродукции и кроссинговера делают поиск направленным. Широту поиска обеспечивает то, что процесс ведется на множестве решений – популяции и используется оператор мутации.

В отличие от других методов оптимизации ГА оптимизируют различные области пространства решений одновременно и более приспособлены к нахождению новых областей с лучшими значениями целевой функции за счет объединения квазиоптимальных решений из разных популяций.

Классический ГА в общем случае содержит следующие шаги:

1. Создание начальной популяции.
  - 1.1. Инициализация хромосомы каждой особи.
  - 1.2. Оценивание начальной популяции.
2. Этап эволюции – построение нового поколения.
  - 2.1. Отбор кандидатов на скрещивание (селекция).
  - 2.2. Скрещивание, т.е. порождение каждой парой отобранных кандидатов новых индивидов.
  - 2.3. Мутация.
  - 2.4. Фильтрация хромосом, представляющих собой невозможные решения
  - 2.5. Оценивание новой популяции.

Критерием останова алгоритма обычно являются либо прохождение максимально допустимого количества поколений, либо достижение функцией приспособленности какой-либо особи некоторого заранее заданного порогового значения.

## 2. Решение практической задачи

Было разработано веб-приложение для построения расписания тренировок группы теннисистов разного пола, возраста и уровня игры. При построении расписания основным ограничением является время, в которое теннисист может принимать участие в тренировках.

Разработанное веб-приложение состоит из двух частей:

- Frontend (интерфейс пользователя), использующий технологии HTML 5, CSS, Javascript, Ajax);
- Backend (непосредственно генетический алгоритм и логика работы приложения), использующий технологии Java 8, Struts-2 framework, Servlets.

Для хранения пользовательских данных (сведения о тренерах и теннисистах), вспомогательной служебной информации, а также о самих тренировках, использовался сервер mysql-5.7 (<https://dev.mysql.com/>). Приложение было размещено на локальном Веб-Сервере Apache Tomcat-8 (<http://tomcat.apache.org/>).

Главная страница разработанного приложения показана на рис. 1.



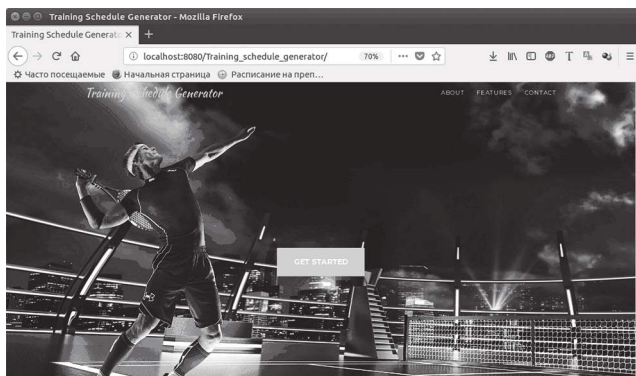


Рис. 1. Главная страница приложения

После нажатия на кнопку “Get Started” пользователь переходит на страницу Входа в систему/ Регистрации, вид которой приведен на рис.2. В данном приложении предполагается, что может быть несколько тренеров и у каждого из них будет своя отдельная учетная запись в системе. После успешной регистрации пользователь переходит на страницу успешной регистрации. Если же при регистрации или попытке входа в систему происходит какой-либо сбой, то пользователь переходит на страницу повторного входа в систему.

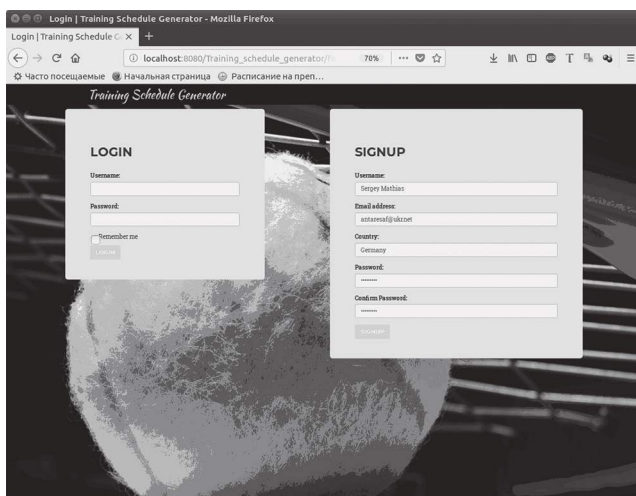


Рис. 2. Страница входа в систему и регистрации

После успешной регистрации и входа в систему пользователь переходит на страницу ввода данных, которая приведена на рис. 3.

В форме, показанной на рис.3, необходимо ввести информацию о количестве тренировок в день (рис. 4); о наличии перерывов между тренировками (рис. 5) и о том, по каким именно дням недели данные тренировки будут проходить; о тренерах и теннисистах (рис. 6).

После того, как вся информация была введена, пользователь может перейти непосредственно к составлению расписания. Пример построенного расписания показан на рис. 7. При составлении расписания генетическим алгоритмом учитывались следующие жесткие ограничения:

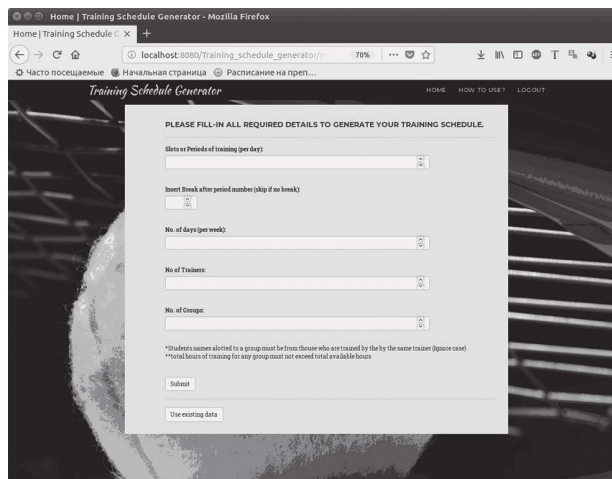


Рис. 3. Страница ввода данных

- максимальный размер группы – 4 человека;
- в группах могут быть игроки только одного пола;
- разница в возрасте игроков в одной группе не может превышать 3 лет;
- разница в силе удара игроков в одной группе не должна превышать 7 ЛК.

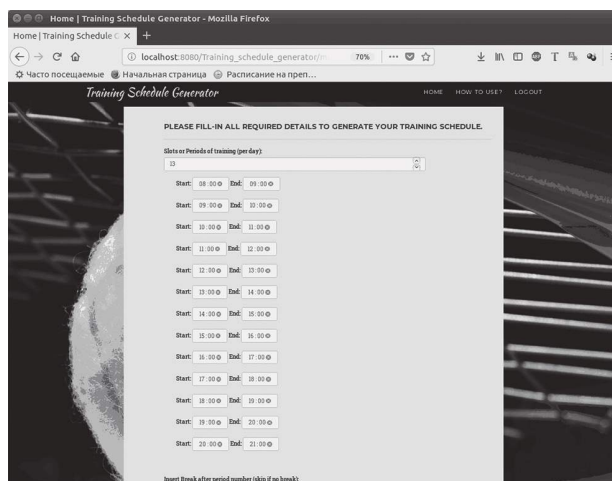


Рис. 4. Ввод информации о количестве тренировок в день

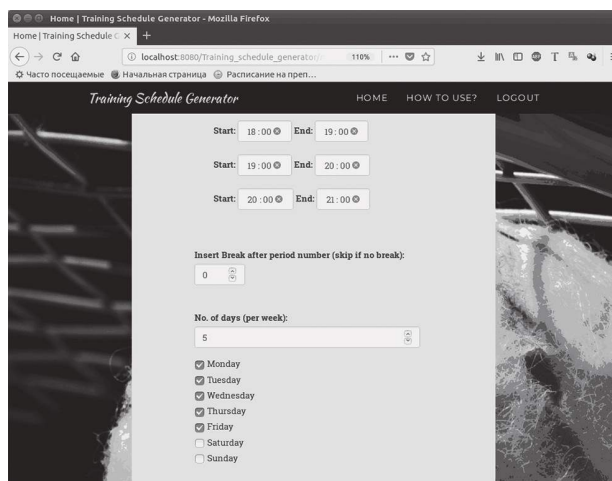


Рис. 5. Ввод информации о наличии перерывов между тренировками и о том, по каким именно дням недели тренировки будут проходить

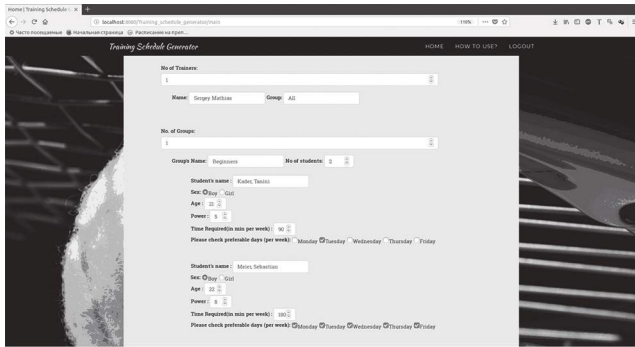


Рис. 6. Ввод информации о тренерах и студентах

### 3. Особенности реализации ГА в приложении

#### Инициализация популяции. В начале работы ГА

производилась инициализация популяции, состоящей из 1000 особей. Каждая особь кодировалась с помощью хромосомы, представляющей из себя последовательность из 520 ген (26\*5\*4, где 26 — число слотов в день, 5 — количество игровых дней в неделе, 4 — максимальное количество игроков в период времени). Каждый ген являлся целым числом, соответствующим идентификационному номеру игрока в базе данных. Пример хромосомы, кодирующей одно из решений задачи составления расписания, показан на рис.8. Таким образом, при решении задачи использовалось прямое целочисленное кодирование.

При прямом кодировании само расписание является хромосомой. В этом случае расписание принимает форму последовательности событий, сгруппированных по датам и времени, либо список всех событий в расписании, каждое из которых имеет назначенное время. При таком кодировании представление решения в виде хромосомы обычно является довольно громоздким и требует разработки сложных генетических операторов для работы с ним. Так, например, оператору кроссовера необходимо обеспечить скрещивание таким образом, чтобы части двух разных расписаний при объединении формировали допустимый график. Также при изменении прямого представления расписания требуется оператор восстановления хромосомы, устраняющий ошибки, возникающие после применения генетических операторов. Однако в сложной реальной задаче, такой как составление расписания, прямое кодирование может быть наиболее предпочтительным, так как генетические операторы могут получить доступ к расписанию в его естественной форме и совершить эффективные перестановки и исправления.

В качестве альтернативы, расписание может быть закодировано в хромосоме непрямым образом, например, в виде перестановок игроков. При таком подходе вместо того чтобы кодировать всю информацию о расписании в самой хромосоме,

список игроков служит в качестве основы для создания расписания. Порядок игроков в списке напрямую не отображает расписание, но он влияет на расписание, составленное на его основе. Затем это расписание может быть оценено на основе заданных ограничений. Недостатком косвенного кодирования является то, что трудно предсказать, как изменение порядка элементов в хромосоме повлияет на само расписание. Таким образом, задание конкретных изменений в расписании становится практически невозможным.

#### TRAINER: SERGEY RUDENKO

	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
15:00-15:30					Tanja Schneider (2006, 23) Paulina Mayer (2006, 23) Julia Müller (2010, 23) Dejana Kovacevic (2006, 23)
15:30-16:00	Sebastian Dörr (2000, 23) Jeremy Mayer (2002, 23) Heinze, Sven Niklas (2000, 22)				Tanja Schneider (2006, 23) Paulina Mayer (2006, 23) Julia Müller (2010, 23) Dejana Kovacevic (2006, 23)
16:00-16:30	Sebastian Dörr (2000, 23) Jeremy Mayer (2002, 23) Heinze, Sven Niklas (2000, 22)		Melvin Riemer (2009, 23) Daniel Magdic (2009, 23) Justin Becker (2007, 23) Ben Claus (2006, 23)	Aylin Bergmann (2008, 23) Jekaterina Belaschova (2007, 23) Josefine Papenfuhs (2004, 23) Gloria Mann (2009, 23)	
16:30-17:00	Sebastian Dörr (2000, 23) Jeremy Mayer (2002, 23) Heinze, Sven Niklas (2000, 22)	Marian, Stefan (1990, 4) Schad, Maximilian (1999, 16) Mannhart, Georg (1999, 18)	Melvin Riemer (2009, 23) Daniel Magdic (2009, 23) Justin Becker (2007, 23) Ben Claus (2006, 23)	Aylin Bergmann (2008, 23) Jekaterina Belaschova (2007, 23) Josefine Papenfuhs (2004, 23) Gloria Mann (2009, 23)	Faust, Henrik (2001, 16) Becker, Tim (2001, 23) Faust, Marlon (2002, 20) Steiner, Falk (2002, 18)
17:00-17:30	Florian Biehrer (2009, 23) Connor Lünig (2008, 23) Julian Pechorn (2007, 23)	Marian, Stefan (1990, 4) Schad, Maximilian (1999, 16) Mannhart, Georg (1999, 18)	Elea Knaur (2004, 20) Timm Larah (2004, 21) Jelena Barun (2000, 20) Ionescu, Annabelle (2003, 21)	Marian, Stefan (1990, 4) Holm, Steven (1998, 13) Schad, Maximilian (1999, 16)	Faust, Henrik (2001, 16) Becker, Tim (2001, 23) Faust, Marlon (2002, 20) Steiner, Falk (2002, 18)
17:30-18:00	Florian Biehrer (2009, 23) Connor Lünig (2008, 23) Julian Pechorn (2007, 23)	Marian, Stefan (1990, 4) Schad, Maximilian (1999, 16) Mannhart, Georg (1999, 18)	Elea Knaur (2004, 20) Timm Larah (2004, 21) Jelena Barun (2000, 20) Ionescu, Annabelle (2003, 21)	Marian, Stefan (1990, 4) Holm, Steven (1998, 13) Schad, Maximilian (1999, 16)	Faust, Henrik (2001, 16) Becker, Tim (2001, 23) Faust, Marlon (2002, 20) Steiner, Falk (2002, 18)
18:00-18:30	Anna Kreis (2008, 23) Aylin Bergmann (2008, 23) Charlotte Wegner (2006, 23)	Schautor Laurenz (2009, 23) Daniel Magdic (2009, 23) Leon (2004, 23) Connor Lünig (2008, 23)	Elea Knaur (2004, 20) Jelena Barun (2000, 20) Ionescu, Annabelle (2003, 21)	Marian, Stefan (1990, 4) Holm, Steven (1998, 13) Schad, Maximilian (1999, 16)	
18:30-19:00	Anna Kreis (2008, 23) Aylin Bergmann (2008, 23) Charlotte Wegner (2006, 23)	Schautor Laurenz (2009, 23) Daniel Magdic (2009, 23) Leon (2004, 23) Connor Lünig (2008, 23)	Max Grembowski (2002, 23) Sven Becker (2000, 23) Vincent Spreng (2002, 23) Henzler, Adrian (2002, 20)	Jelena Barun (2000, 20) Papenfuhs, Antonia (2000, 19) Elea Knaur (2004, 20) Salzmann, Elisabeth (2000, 23)	Sondergeld, Rachel (1981, 23) Rosana Magdic (1980, 23) Müller, Katharina (1998, 18) Muerell, Carina (1992, 22)

Рис. 7. Пример расписания тренировок, полученного с помощью ГА

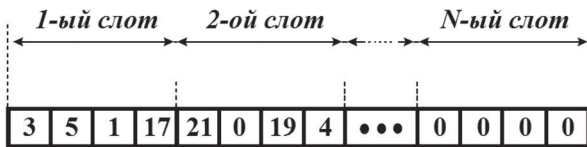


Рис. 8. Пример хромосомы, кодирующей решение задачи составления расписания

В результате проведенных исследований был сделан вывод о том, что применение прямого целочисленного кодирования является более простым для данной практической задачи. Однако при таком кодировании возникает необходимость реализации процедуры восстановления хромосом, которая исправляла бы (либо удаляла) из популяции невозможные (поврежденные) хромосомы, появляющиеся вследствие применения генетических операторов скрещивания и мутации. Выбор целочисленного (а не вещественного кодирования, которое более соответствует эволюционным стратегиям), обусловлен тем, что каждый ген хромосомы является порядковым номером игрока, поэтому целочисленное кодирование является в данном случае более предпочтительным.

**Элитизм.** Обычно при реализации ГА предполагается, что каждое новое поколение создается путем замены всех родителей их потомками. В соответствии с этой схемой репродукции генетический материал переходит к следующему поколению исключительно посредством применения операторов к выбранным родителям. Однако, хромосомы, выбранные с лучшими значениями пригодности, могут сочетаться неэффективным образом и создавать новые хромосомы с низкими значениями пригодности. Более того, стохастическая природа этих методов исключает какую-либо гарантию того, что сильные хромосомы вообще будут выбраны для процесса размножения. Таким образом, полезный генетический материал может быть утрачен для будущих поколений.

Элитизм позволяет устранить данную проблему путем автоматического копирования лучших хромосом из текущего поколения в новое. Остальная часть нового поколения создается с помощью схемы замены поколений. Основная проблема при таком подходе заключается в том, что элитные особи и многие идентичные или похожие их копии могут вскоре начать доминировать в популяции. Однако, как показали эксперименты, применение элитизма позволяет получить лучшие результаты по сравнению с ГА, не использующими элитарность. Поэтому при разработке программы составления тренировок была использована схема репродукции с использованием элитизма. При этом 10% лучших особей переходили (копировались) в новое поколение без каких-либо изменений их хромосом.

**Оператор селекции.** При разработке программы составления теннисных тренировок были

протестированы различные операторы селекции. Наиболее эффективным оказался гибридный подход, который сочетает в себе случайную и ранговую селекцию. Данный оператор работает следующим образом: все особи популяции сортируются (ранжируются) в порядке убывания значения их фитнес-функций. Максимальным значением фитнес-функции для каждой особи является 1, а минимальным – 0. Затем датчиком случайных чисел генерируется некоторое число  $P$ , лежащее в интервале от 0 до  $N/10$  (где  $N$  – размер популяции). После этого в цикле суммируются значения фитнес-функций особей до тех пор, пока данная сумма не превышает  $P$ . Затем цикл останавливается и предпоследняя особь, участвовавшая в формировании общей суммы, выбирается в качестве одного из родителей. Такой подход позволяет обеспечить случайный выбор родителей из 10% наиболее приспособленных особей.

**Оператор скрещивания.** Основным оператором, влияющим на качество решений, полученных с помощью ГА, является оператор скрещивания [14]. Способность генетических алгоритмов совмещать различные решения отличает их от других эвристических методов. Поэтому операторы кроссовера должны быть реализованы таким образом, чтобы хорошо приспособленные родители могли быть интегрированы в одно более приспособленное потомство.

Наиболее часто в ГА применяется простой одноточечный оператор кроссовера. Он обменивает части родительских хромосом с каждой стороны случайно выбранной точки пересечения. Например, в двух 10-битовых хромосомах, если точка пересечения находится между пятым и шестым битами, первое потомство наследует от первого до пятого бита первого родителя и от шестого до десятого биты второго родителя. Второе потомство получает оставшиеся половинки родителей. Этот процесс очень похож на генетическую рекомбинацию в реальной ДНК. Одноточечный кроссовер эффективен в некоторых простых случаях, но в реальных задачах он обычно генерирует непригодные хромосомы [15]. Двухточечный же кроссовер обменивает гены вокруг двух точек пересечения, что позволяет составлять большее количество возможных комбинаций. Именно такой оператор и был использован при решении задачи составления расписания тренировок.

**Оператор мутации.** В то время как оператор кроссовера пытается объединить уже рассмотренные хорошие решения, оператор мутации вводит разнообразие в популяцию и позволяет алгоритму генерировать новые решения, которые невозможно получить лишь с использованием одного только оператора кроссовера. Кроссовер может привести только к созданию ограниченного набора

хромосом на основе родителей. Применяя небольшое количество мутаций к хромосоме, можно исследовать новые области поискового пространства.

Наиболее распространенным типом мутации с кодированием битовых строк является простая битовая мутация, в которой значение случайного бита в хромосоме родительской особи инвертируется. При использовании же целочисленного кодирования, мутация может быть реализована несколькими способами. Один метод, известный как позиционная мутация, состоит в удалении элемента из одной позиции и вставке его в хромосому в другую позицию, соответственно изменяя и другие гены. Другой подход, основанный на порядке следования генов, осуществляет перестановку двух элементов в хромосоме. Альтернативный подход, который считается весьма эффективным на практике, основан на скрамблировании генов в хромосоме. Этот метод создает хромосому потомка, переставляя гены родительской хромосомы.

Для каждого из операторов мутации необходимо определять параметр, регулирующий степень мутации. Для первых двух методов данный параметр определяет количество заменяемых или переставляемых генов, а для третьего подхода параметр мутации может определять размер области хромосомы-родителя, в которой будут осуществлены перестановки.

**Вычисление фитнес-функции.** Как уже отмечалось, при решении реальной практической задачи с использованием ГА, построение эффективной фитнес-функции является одним из самых сложных и ответственных этапов. Фитнес-функция должна оценивать удовлетворение мягких и жестких ограничений, а также штрафовать за любое их нарушение. В разработанной программе, фитнес-функция использует хромосому в качестве входных данных и возвращает значение пригодности в диапазоне от нуля (наименее приспособленная особь) до единицы (наиболее приспособленная особь).

В разработанном приложении фитнес-функция представляла собой совокупность взвешенных шести рейтингов для каждого слота расписания, которые можно сформулировать следующим образом:

- R1 – рейтинг соответствия времени (игрок играет в то время, которое выбрал);
- R2 – рейтинг соответствия пола игроков;
- R3 – рейтинг соответствия возраста игроков;
- R4 – рейтинг соответствия силы удара игроков;
- R5 – рейтинг соответствия количества забронированных слотов выбранной продолжительности тренировки (60 мин – 2 слота подряд, 90 мин – 3 слота подряд);

– R6 – рейтинг компактности тренировок (используемые слоты находятся в непосредственной близости).

Тогда значение фитнес-функции может быть вычислено следующим образом:

$$F(i) = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^6 w_l R_l(k)}{N},$$

где  $N$  – общее количество слотов;  $w_l$  – вес  $l$ -го рейтинга.

Максимальное значение данной функции равно 1, а минимальное – 0. Минимальное значение фитнес-функции будет получено в случае, если для каждого слота будут нарушены все ограничения. Максимальное значение достигается в том случае, когда сумма всех рейтингов для каждого слота равна 1 (т.е. все ограничения удовлетворены). Тогда сумма рейтингов всех слотов будет равна  $N$ , а фитнес-функция данного решения станет равной 1 ( $N/N$ ), что для практической задачи обычно является недостижимым.

#### 4. Сравнение решений, полученных с помощью ГА, алгоритма случайного поиска и разработанного экспертом-человеком

Одной из задач, которые часто возникают в исследованиях ГА, является демонстрация его превосходства над алгоритмом случайного поиска, в котором большое количество решений рассматривается случайным образом до тех пор, пока не будет найдено достаточно хорошее. В данной работе к сравнению было также добавлено решение, полученное экспертом-человеком. Для сравнения эффективности генетического алгоритма и алгоритма случайного поиска, оба алгоритма выполнялись в течении 60 мин при прочих равных условиях. Результаты эксперимента приведены на рис. 9.

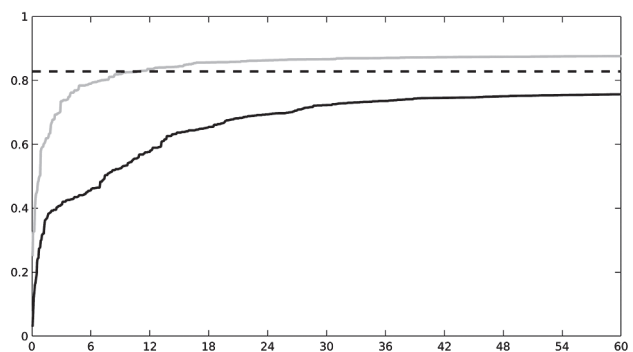


Рис. 9. Результаты сравнения ГА, алгоритма случайного поиска и решения, полученного экспертом-человеком

На рисунке красной пунктирной линией показано значение фитнес-функции решения, полученного экспертом-человеком, зеленой линией показан график изменения фитнес-функции наилучшего решения в популяции, полученного с помощью ГА, а синей – наилучшее решение,

полученное на текущий момент времени с помощью алгоритма случайного поиска.

Как видно из результатов эксперимента, эксперт-человек составил достаточно качественное расписание, которое превзошло все решения, полученные с помощью метода случайного поиска. Применение же генетического алгоритма позволило достаточно быстро найти решение, превосходящее по своим характеристикам решение эксперта. Следует, однако, отметить, что эксперт-человек обладает некоторыми преимуществами над автоматическими алгоритмами, так как может прибегать к сознательным незначительным нарушениям заданных ограничений с последующим их согласованием с теннисистами и тренерами. Автоматические же алгоритмы в свою очередь обладают мощным вычислительным потенциалом, недостижимым для человека. Эксперт физически не может разработать и оценить такое количество решений (порядка 200-300 тысяч), которое было рассмотрено алгоритмами.

#### Выводы

В данной статье рассмотрена задача составления расписания спортивных тренировок с помощью генетических алгоритмов, основным преимуществом которых является то, что многие параметры решаемой задачи могут быть закодированы в геноме и определяться параллельно. Более того, в отличие от большинства алгоритмов оптимизации, предназначенных для потактового решения задачи, ГА оперируют с множеством решений – популяцией, что позволяет достичь глобального экстремума, не застревая в локальных. При этом информация о каждой особи популяции кодируется в хромосоме (генотипе), а получение решения (фенотипа) осуществляется после эволюции (отбора, скрещивания, мутации) путем декодирования.

Результатом решения практической задачи является полная автоматизация процесса построения расписания тренировок для группы теннисистов.

Результаты работы полученного вэб-приложения подтверждают высокую эффективность и быстрое действие ГА.

#### Список литературы:

1. *Fogel D.B.* An introduction to simulated evolutionary optimization / D.B. Fogel // IEEE Trans. on Neural Networks. – 1994. – v.5. – №1. – P. 3-14.
2. *Goldberg D.E.* Genetic algorithms and machine learning / D.E. Goldberg, J.H. Holland // Mach. Learn. – 1988. – v.3(2). – P. 95–99.
3. *Mitchell T.M.* Machine learning / T.M. Mitchell. – McGraw-Hill, Boston. – 1997. – 267 p.
4. *Holland J.H.* Adaption in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, 1975. – 211 p.
5. *Holland J.H.* Adaptation in Natural and Artificial Systems 2nd edn / J. Holland – Cambridge, MIT Press. – 1992. – 228 p.
6. *Goldberg D.E.* Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning / D.E. Goldberg. – Addison Wesley Longman, 1989. – 372 p.
7. *Tomassini M.* A survey of genetic algorithms / M. Tomassini // Annual Reviews of Computational Physics. – 1995. – Vol.3. – P. 87-118.
8. *Dumitrescu D.* Evolutionary Computation / D. Dumitrescu, B. Lazzarini, L.C. Jain, A. Dumitrescu // CRC Press, 2000.
9. *Michaliwicz Z.* Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs / Z. Michaliwicz – Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 3-rd ed., 1996.
10. *Forrest S.* Genetic algorithms: Principles of natural selection applied to computation / S. Forrest // Science. – 1993. – v. 261(5123). – P. 872–878.
11. *Grefenstette J.J.* Optimization of control parameters for genetic algorithms / J.J. Grefenstette // IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics. – 1986. – v. 16(1). – P. 122–128.
12. *Mitchell M.* An Introduction to Genetic Algorithms (Complex Adaptive Systems) / M. Mitchell. – MIT Press, Cambridge, 1998. – 221 p.
13. *Coley D.A.* An introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers / D.A. Coley – World Scientific Publishing, Singapore, 1999. – 244 p.
14. *Daniel Costa.* An evolutionary tabu search algorithm and the NHL scheduling problem. INFOR, 88(8): 161 178, 1995.
15. *George L. Nemhauser and Michael A. Trick.* Scheduling a major college basketball conference. Operations Research 46:1 8, 1998.

Поступила в редколлегию 05.04.2018

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.Г. Руденко, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеца, Харьков

УДК 004.891.3



В.М. Левикін, О.В. Чала

ХНУРЕ, м. Харків, Україна, levykinvictor@gmail.com

ХНУРЕ, м. Харків, Україна, oksana.chala@nure.ua

## ПІДТРИМКА УПРАВЛІННЯ СКЛАДЕНИМ ОБ'ЄКТОМ В ІУС З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕМПОРАЛЬНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ

Розглянуто проблему підтримки управління складеними об'єктами в умовах невизначеності, що характеризуються неповнотою інформації про стан об'єкту управління, що виникла в результаті неконтрольованих зовнішніх впливів. Запропоновано принципи підтримки управління підприємством як складеним об'єктом в умовах невизначеності на основі темпоральних знань. Розроблено темпоральну модель складеного об'єкту. Модель забезпечує можливість більше ефективного управління складеним об'єктом в умовах невизначеності за рахунок формування управляючих дій на основі ймовірнісних темпоральних залежностей. Запропоновано метод підтримки циклу управління складеним об'єктом в інформаційно-управляючих системах в умовах невизначеності на основі темпоральних знань. Метод поєднує традиційне управління на основі детермінованої моделі комплексного об'єкту із формуванням та використанням бази темпоральних знань для оцінки поточного стану об'єкту та підтримки управління шляхом побудови найбільш ймовірних послідовностей управлінських дій щодо поточного стану об'єкту управління.

**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩА СИСТЕМА, ПІДТРИМКА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ, ТИМПОРАЛЬНА ЗАЛЕЖНІСТЬ, ТИМПОРАЛЬНА БАЗА ЗНАНЬ**

**Левыкин В.М., Чала О.В. Поддержка управления составным объектом в ИУС с использованием темпоральных зависимостей.** Рассмотрена проблема поддержки управления составными объектами в условиях неопределенности, характеризующихся неполнотой информации о состоянии объекта управления, возникшей в результате неконтролируемых внешних воздействий. Предложены принципы поддержки управления предприятием как составным объектом в условиях неопределенности на основе темпоральных знаний. Разработана темпоральная модель составного объекта. Модель обеспечивает возможность более эффективного управления составным объектом в условиях неопределенности за счет формирования управляющих воздействий на основе вероятностных темпоральных зависимостей. Предложен метод поддержки цикла управления составным объектом в информационно-управляющих системах в условиях неопределенности на основе темпоральных знаний. Метод сочетает традиционное управление на основе детерминированной модели комплексного объекта с формированием и использованием базы темпоральных знаний для оценки текущего состояния объекта и поддержки управления путем построения наиболее вероятных последовательностей управленческих действий относительно текущего состояния объекта управления.

**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА, ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, ТЕМПОРАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ, ТЕМПОРАЛЬНАЯ БАЗА ЗНАНИЙ**

**Levykin V.M., Chala O.V. Supporting for managing the composite object in the MIS using temporal dependencies.** The problem of supporting the management of composite objects in the conditions of uncertainty characterized by incomplete information about the state of the control object arising as a result of uncontrolled external influences is considered. The principles of supporting the management of an enterprise as a composite object in conditions of uncertainty based on temporal knowledge are proposed. The temporal model of composite object is developed. The model provides an opportunity for more effective management of a composite object under uncertainty due to the formation of control effects based on probabilistic temporal dependencies. The method of supporting the control cycle of a composite object in information-control systems in the conditions of uncertainty based on temporal knowledge is proposed. The method combines traditional management based on a deterministic model of a complex object with the formation and use of a temporal knowledge base to evaluate the current state of an object and support control by constructing the most probable sequences of management actions in relation to the current state of the control object.

**INFORMATION MANAGEMENT SYSTEM, DECISION SUPPORT, TEMPORAL DEPENDENCE, TEMPORAL KNOWLEDGE BASE**

### Вступ

Інформаційно-управляюча система реалізує задачі управління підприємством як складеним об'єктом на основі автоматизованого збору та обробки інформації про діяльність та поточний стан цього підприємства [1]. Задачі управління реалізуються в умовах як внутрішніх, так і непередбачуваних зовнішніх впливів [2]. Це приводить до виникнення невизначеності щодо стану об'єкту

управління. Така невизначеність пов'язана з неповнотою інформації як про стан параметрів об'єкту управління, так і про характеристики зовнішніх впливів, що змінюють цей стан.

Задачі управління у випадку неповноти інформації про стан окремих параметрів можуть бути вирішені з використанням апріорно заданих моделей об'єкту управління та знань про типові залежності в даній предметній галузі [3]. Однак у

випадку непередбачуваних зовнішніх впливів при управлінні доцільно використовувати та постійно поповнювати базу знань, що формалізує досвід експертів – кваліфікованих працівників даного підприємства [4]. Така база знань може бути сформована двома способами: традиційним, на основі інтерв'ювання співробітників [5], та шляхом аналізу поведінки об'єкту управління.

Перший підхід потребує значних матеріальних та часових витрат, що утруднює вирішення задачі постійного поповнення бази знань в реальному часі. Другий підхід забезпечує можливість автоматизованої побудови та поповнення бази знань в реальному часі. Однак аналіз записів про поведінку об'єкту управління не завжди дозволяє виділити причинно-наслідкові залежності між його станами. Тому в даному випадку доцільно виділяти та використовувати темпоральні залежності [6], які задають можливі послідовності станів об'єкту управління.

Питання автоматизованої побудови бази знань для підтримки управління з використанням темпоральних залежностей розглянуті в роботі [7]. В якості вхідних даних використовується опис поведінки об'єкту управління в формі журналів подій [8]. Структуризація цих знань виконана в роботах [9, 10]. Однак питанням моделювання складеного об'єкту управління на основі темпоральних залежностей та управління з використанням цих залежностей не приділено достатньо уваги.

### 1. Постановка задачі

Метою статті є розробка знання-орієнтованого підходу до управління комплексним об'єктом в ІУС в умовах невизначеності на основі аналізу поведінки такого об'єкту, представленої у вигляді множини послідовностей його станів.

### 2. Принципи підтримки управління підприємством як складеним об'єктом в умовах невизначеності

Управління підприємством як складеним об'єктом полягає у формуванні управлінських рішень на основі використання інформації про поточний стан цього об'єкту.

Об'єкт управління (ОУ) є складеним, якщо він складається із декількох взаємопов'язаних атомарних об'єктів, що потребує розробки набору алгоритмів управління.

Управління реалізується у вигляді багатетапного процесу, що визначає поведінку об'єкту управління у часі. Така поведінка представлена у вигляді послідовності станів, кожен із яких характеризується множиною змінних.

Оцінка значень цих змінних дозволяє встановити, чи досягнуто мету управління.

Зазвичай значення контрольованих змінних можуть бути виміряні безпосередньо або отримані

в результаті обробки інформації про другі змінні предметної області.

Тому доцільно виділити дві умови виникнення невизначеності при управлінні в ІУС:

- неповнота інформації про поточний стан об'єкту управління;
- наявність неконтрольованих зовнішніх впливів на об'єкт управління.

Сформулюємо принципи управління підприємством як комплексним об'єктом в умовах невизначеності.

1. Використання темпоральних знань для опису поведінки об'єкту управління. Важливість даного принципу полягає в тому, що доступна для спостереження поведінка об'єкту управління зазвичай може бути представлена у вигляді послідовності станів. Кожен із цих станів характеризується множиною значень змінних. Тобто ми можемо визначити залежності в часі між станами та окремими змінними. Але інформація про причинно-наслідкові залежності між цими станами є доступною лише для типових режимів функціонування.

2. Використання ймовірнісних характеристик для темпоральних знань внаслідок відсутності інформації про причинно-наслідкові зв'язки між станами об'єкту управління. Ймовірнісна характеристика знань дає можливість упорядкувати альтернативні варіанти управління комплексним об'єктом і запропонувати ОПР найбільш ймовірні рішення.

3. Формування та використання темпоральних обмежень як підмножини темпоральних знань для відбору лише допустимих варіантів управління із підмножини можливих з тим, щоб підвищити ефективність прийняття рішень з управління в умовах невизначеності.

3. Інтеграція традиційної детермінованої моделі об'єкту управління, що побудована на основі апріорних знань із ймовірнісною моделлю на основі темпоральних залежностей. Детермінована модель може бути використана для управління в типових режимах роботи, а темпоральна – в умовах невизначеності.

4. Постійне поповнення, в тому числі в реальному часі, бази темпоральних знань, що дає можливість використовувати адекватну темпоральну модель об'єкту управління при виникненні нових непередбачуваних збурень.

### 3. Темпоральна модель комплексного об'єкту управління в умовах невизначеності

Розглянемо спочатку детерміновану версію об'єкту управління. Нехай поточний стан об'єкту управління  $\bar{s}_j$  задається вектором атрибутів  $a_j^k$  атомарних об'єктів предметної області, які містять у собі інформацію про поточні властивості цих об'єктів та дії, в результаті яких виникли вказані

значення властивостей:

$$\bar{s}_j = \begin{bmatrix} a_j^1 \\ \dots \\ a_j^k \\ \dots \\ a_j^K \end{bmatrix} : a_j^k \in D_u \vee a_j^k \in C, \quad (1)$$

де  $D_u$  – множина управляючих дій;  $C$  – множина властивостей атомарних об’єктів, що складають контекст виконання управляючих дій.

Якщо позначити управляючі дії як  $u$ , тобто  $a_j^k \in D_u \equiv u_j^k \in D_u$ , то поточний стан доцільно представити у вигляді двох складових: вектору управлінських дій  $\bar{u}$  та вектору контексту цих дій  $\bar{c}$ . Тоді узагальнена модель об’єкту управління без урахування невизначеності має вигляд:

$$\begin{cases} \bar{c}_{j+1} = f(\bar{c}_j, \bar{u}_{j+1}) \\ \bar{c}_j = q(\bar{c}_j), j = \overline{1, J}, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\bar{c}_{j+1}$  – стан контексту в наступний дискретний момент часу, після виконання дій  $\bar{u}_{j+1}$ ;  $\bar{u}_{j+1}$  – множина управляючих дій, що переводить об’єкт управління у стан  $\bar{u}_{j+1}$ ;  $\bar{c}_j$  – цільовий стан контексту, що пов’язаний із вирішенням задачі управління.

Тобто залежність  $q$  задає зв’язок поточного стану об’єкту управління із цільовим станом. Оскільки послідовний перехід від стану контексту  $\bar{c}_j$  до стану  $\bar{c}_{j+1}$  визначається функцією  $f$ , то залежність  $q$  є транзитивним замиканням залежності  $f$ .

Стан контексту виконання дій визначається через підмножину властивостей атомарних об’єктів (артефактів) предметної області:

$$\bar{c}_{j+1} = \begin{bmatrix} a_{j+1}^1 \\ \dots \\ a_{j+1}^m \\ \dots \\ a_{j+1}^M \end{bmatrix} : a_j^m \in C, M < K, \quad (3)$$

де  $M$  – кількість елементів вектору стану контексту;  $K$  – кількість елементів вектору стану об’єкту управління.

Із виразів (1)–(3) видно, що поточний стан в кожний дискретний момент часу  $j+1$  визначається станом в попередній момент часу  $j$  та вектором управляючих дій  $\bar{u}_{j+1}$ , що були виконані після моменту часу  $j$ . Це і визначає можливість побудови моделі комплексного об’єкту у вигляді апріорно заданих аналітичних або алгоритмічних залежностей  $f$  та  $q$ .

Однак у випадку невизначеності, що виникла внаслідок непередбачуваних зовнішніх збурень  $\bar{\xi}$  та неможливості встановити точні значення змінних  $a_j^k$  модель об’єкту управління приймає вигляд:

$$\begin{cases} \bar{c}_{j+1} = f(\bar{c}_j, \bar{u}_{j+1}, \bar{\xi}_{j+1}) \\ \bar{c}_j = q(\bar{c}_j, \bar{\xi}_j), j = \overline{1, J}. \end{cases} \quad (4)$$

Індекс  $j+1$  для вектору  $\bar{\xi}_{j+1}$  задає момент виникнення цих збурень після  $j$  – стану об’єкту управління.

Тобто залежності  $f$  та  $q$  задають діапазони управляючих дій, які визначають множину альтернативних переходів від поточного до наступного стану контексту об’єкту управління (у випадку функції  $f$ ) або цільового (у випадку функції  $q$ ):

$$\begin{cases} \bar{c}_{j+1} = f_1(\bar{c}_j, \bar{u}_{j+1}) \vee f_2(\bar{c}_j, \bar{u}_{j+1}) \vee \dots \vee f_I(\bar{c}_j, \bar{u}_{j+1}) \\ \bar{c}_j = q_1(\bar{c}_j) \vee q_2(\bar{c}_j) \vee \dots \vee q_I(\bar{c}_j), j = \overline{1, J}. \end{cases} \quad (5)$$

У відповідності до (4) та (5), для управління об’єктом в умовах неконтрольованих збурень необхідно встановити діапазон управляючих дій, що дають можливість перейти від стану  $\bar{s}_j$  до стану  $\bar{s}_{j+1}$  (або  $\bar{s}_j$ ), тобто від контексту  $\bar{c}_j$  до контексту  $\bar{c}_{j+1}$  (або  $\bar{c}_j$ ). Очевидно, що такі дії або послідовності дій матимуть різну ймовірність. Остання залежатиме як від збурення, так і від поточного стану об’єкту управління.

Ілюстрацію даного підходу для пари послідовних станів контексту виконання дій наведено на рис. 1.

Як видно з рис. 1, перехід між парою послідовних станів відбувається в результаті однієї з альтернативних управляючих дій, що задана вектором. Елементами цього вектору, наприклад, є: назва дії; стан дії; пріоритет дії; параметри дії, і т.п. Вибір дії залежить від збурення.

Таким чином, для підтримки управління комплексними об’єктами в умовах непередбачуваних зовнішніх збурень традиційну аналітичну модель доцільно доповнити темпоральними залежностями, які задають послідовність зміни станів об’єкту управління в часі.

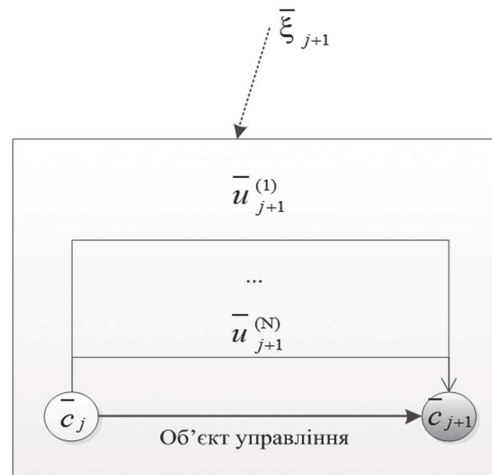


Рис. 1. Зміна контексту виконання дій на об’єкті управління в умовах невизначеності

З рис. 1 видно, що наведені залежності можуть задавати зв’язок між такими елементами: станами об’єкту управління в цілому; станом контексту та управлінськими діями.



Залежності першого типу можуть бути згідно виразу (5) визначені як для пари послідовних станів, так і для пари довільних станів, наприклад (поточний стан; цільовий стан).

Залежності для пари послідовних станів позначимо  $R^X$ , а непослідовних – як  $R^F$ . Оскільки кожний наступний стан об'єкту управління залежить від попереднього стану та виконаної управлінської дії, то можна стверджувати, що дані залежності описують структурний рівень послідовності дій на об'єкті управління [10]. Вони задають можливі та допустимі послідовності дій у часі. Тобто залежності  $R^X$  та  $R^F$  дозволяють визначити кінцеву послідовність станів та дій, що вирішує одну із управлінських задач (або підзадач). Така послідовність дій може бути розглянута як єдине ціле. Тобто при управлінні виконується вибір послідовності в цілому. В подальшому задана послідовність виконується до досягнення цільового стану, як представлено на рис. 2.

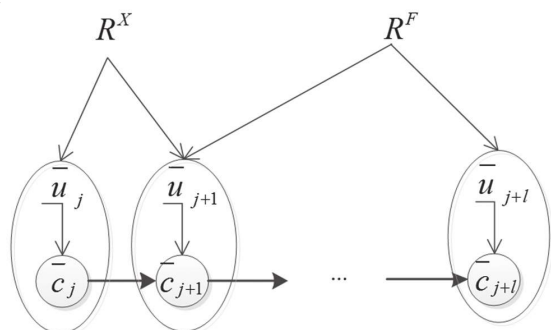


Рис. 2. Залежності між станами об'єкту управління

Вибір однієї з послідовностей станів  $\{\bar{s}_j, \bar{s}_{j+1}, \dots, \bar{s}_{j+l}\}$  або відповідних дій  $\{\bar{u}_j, \bar{u}_{j+1}, \dots, \bar{u}_{j+l}\}$  виконується з урахуванням поточного стану контексту на об'єкті управління, тобто з урахуванням залежностей  $R^U$  між станом контексту та діями, як показано на рис. 3.

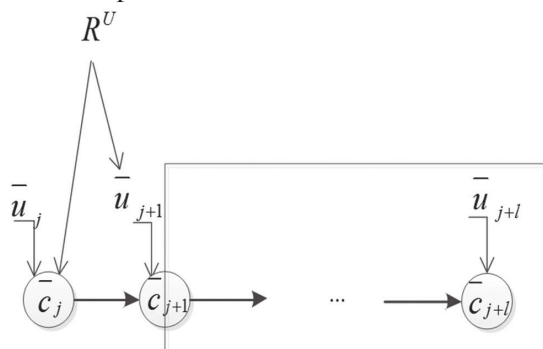


Рис. 3. Залежності між контекстом та управляючими діями

Сукупність цих залежностей становить темпоральну модель об'єкту управління:

$$M_{Co} \begin{cases} R^X(\bar{s}_j, \bar{s}_{j+1}), \\ R^F(\bar{s}_j, \bar{s}_{j+l}), \\ R^U(\bar{c}_j, \bar{c}_{j+l}, \bar{u}_{j+l}). \end{cases} \quad (6)$$

Така модель інтегрує знання про типові послідовності дій на об'єкті управління у формі залежностей  $R^X$  та  $R^F$ , а також умови вибору цих послідовностей дій в залежності від поточного стану контексту, представленого у вигляді залежностей  $R^U$ .

Важлива особливість розробленої моделі полягає в тому, що залежності  $R^X$ ,  $R^F$  та  $R^U$  визначають множину альтернативних варіантів поведінки об'єкту (тобто альтернативних алгоритмів управління) для заданого стану  $\bar{s}_j$ , що характеризується контекстом  $\bar{c}_j$ . Тобто вони дозволяють реалізувати декілька алгоритмів управління. Ймовірність застосування кожного з цих алгоритмів залежить від поточного та цільового стану об'єкту управління.

Задачі управління комплексним об'єктом в умовах невизначеності підрозділяються на дві групи: оцінка (або класифікація) поточного стану об'єкту управління; підтримка прийняття рішень із переводу об'єкту до цільового стану.

Узагальнено задача оцінки поточного стану полягає в тому, щоб визначити мінімальну множину послідовностей станів (або послідовностей управляючих дій)  $\{\langle \bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_j \rangle\}$  від початкового стану  $\bar{s}_1$  до поточного стану  $\bar{s}_j$ , яка дала б можливість віднести даний стан до відомих або до аномальних станів.

При визначенні типового стану використовуються традиційні, апріорно задані моделі об'єкту управління, а аномального – темпоральні залежності.

Задача підтримки управління полягає у знаходженні такої послідовності дій (станів) від поточного стану, яка дає можливість досягнути стану  $\bar{s}_j$  із множини цільових станів об'єкту управління  $S^{Fin}$ . З урахуванням умови невизначеності це свідчить про необхідність побудови множини допустимих послідовностей станів, що із ненульовою ймовірністю дають можливість досягти стану  $\bar{s}_j \in S^{Fin}$ .

#### 4. Метод підтримки циклу управління складеним об'єктом в ІУС в умовах невизначеності на основі темпоральних знань

Представлена вище у загальному вигляді модель комплексного об'єкту управління в умовах невизначеності (5) містить у собі темпоральні залежності, які визначають спектр можливих варіантів поведінки такого об'єкту.

Фактично залежності  $R^X$ ,  $R^F$  та  $R^U$  є знаннями про допустимі послідовності управлінських дій та можливі варіанти вибору таких послідовностей дій із урахування стану контексту.

Ці залежності пов'язують між собою стани об'єкту управління, які повністю або частково доступні для спостереження. Тому вони відображають неформальні знання виконавців, які приймали

рішення та виконували управлінські дії в умовах неконтрольованих зовнішніх впливів та неповноти інформації про стан об'єкту управління [11].

Очевидно, що неформальні на даному циклі управління персональні знання виконавців повинні бути формалізовані для використання на подальших циклах управління. Зазначене потребує використання такої моделі життєвого циклу складеного об'єкту управління, яка забезпечувала б інтеграцію формальної моделі ОУ та бази темпоральних знань із можливістю уточнення знань про поведінку цього об'єкту [12]. Вказані знання можуть бути отримані шляхом аналізу представленої у вигляді послідовності станів поведінки об'єкту управління.

Розроблений метод використовує еволюційну стратегію для підтримки управління комплексним об'єктом. Дана стратегія зазвичай використовується в умовах постійної зміни вимог до результатів управління. Стратегія полягає в ітеративному виявленні нових залежностей  $f_i(c_j, u_{j+1})$  та  $q_i(c_j)$  шляхом аналізу поведінки об'єкту управління та наступному доповненні моделі (5) цими залежностями. Розширена модель (5) може бути використана на новому циклі управління. Альтернативний варіант використання отриманих знань полягає у конфігуруванні цих залежностей у вигляді правил та обмежень в ІУС без включення їх в розширену модель. Це дає можливість використати нові знання на поточному циклі управління.

Фактично даний метод полягає у доповненні типової аналітичної або алгоритмічної моделі складеного ОУ новими залежностями, що є характерними для аномальних режимів роботи. Під аномальними будемо розуміти такі режими функціонування об'єкту управління, які не відображені у його апріорно сформованій моделі.

Метод містить у собі наступні етапи.

Етап 1. Аналіз існуючої моделі об'єкту управління за результатами попереднього циклу управління.

Мета даного етапу полягає у визначенні невідповідностей між існуючою моделлю та реальним ОУ. Даний етап реалізується експертами у відповідній предметній області.

Етап 2. Побудова або уточнення моделі об'єкту управління на основі апріорних знань.

2.1 Побудова детермінованої моделі складеного ОУ з використанням традиційних підходів. Використовуються методи, що враховують характеристики предметної області.

Особливість комплексного об'єкту управління полягає у тому, що він складається із множини взаємопов'язаних атомарних об'єктів — артефактів. Кожен із артефактів потребує свого алгоритму управління. Зазвичай кожен із цих алгоритмів реалізує життєвий цикл артефакту.

2.2. Доповнення моделі об'єкту управління новими залежностями  $R^X$ ,  $R^F$  та  $R^U$ , що були отримані на попередньому циклі управління.

Етап 3. Конфігурування та розгортання моделі ОУ в інформаційно-управляючій системі.

Даний етап реалізується штатними засобами ІУС. Результатом даного етапу є модель ОУ, яка забезпечує підтримку управління.

Етап 4. Етап управління.

Управління реалізується на основі людино-машинної взаємодії, тобто окремі управляючі дії виконуються автоматично, програмними засобами. Інші дії реалізуються виконавцем.

Інформаційна система представляє рекомендації щодо часу та змісту цих дій.

На етапі управління виконуються такі кроки.

4.1. Оцінка поточного стану об'єкту управління.

У випадку типового поточного стану використовується управління за традиційною моделлю та перехід до етапу 5.

У випадку аномального поточного стану перейти до п. 4.2.

4.2. Формування множини допустимих послідовностей управляючих дій на основі відомих темпоральних залежностей з бази темпоральних знань.

4.3. Відбір найбільш ймовірних у даному поточному стані послідовностей управляючих дій.

4.4 Вибір дії або послідовності дій ОПР на основі результатів 4.3.

Етап 5. Формування темпоральних залежностей.

5.1. Виявлення залежностей  $R^X$ ,  $R^F$  та  $R^U$  на основі аналізу поточної послідовності станів об'єкту управління.

5.2. Виявлення підмножин обмежень на основі аналізу отриманих залежностей  $R^X$ ,  $R^F$  та  $R^U$ . Характерна відмінність обмежень полягає в тому, що вони виконуються для всіх відомих циклів управління, тобто для всіх відомих послідовностей станів

$$\left( \left\langle \overline{s_1^{(1)}}, \overline{s_2^{(1)}}, \dots, \overline{s_j^{(1)}} \right\rangle, \dots, \left\langle \overline{s_1^{(z)}}, \overline{s_2^{(z)}}, \dots, \overline{s_j^{(z)}} \right\rangle \right).$$

5.3. Відбір підмножини нових залежностей та обмежень, що відсутні в базі темпоральних знань.

5.4. Відбір нових залежностей на основі значень ймовірності їх реалізації та включення цих залежностей до бази темпоральних знань.

Етап 6. Перевірка досягнення цільового стану. Якщо стан не досягнуто, то перейти до етапу 4. Інакше — завершення роботи.

## Висновки

Розглянуто проблему підтримки управління складеними об'єктами в умовах невизначеності. Такі об'єкти управління містять у собі множину атомарних об'єктів — артефактів та потребують набору альтернативних алгоритмів управління. Умови невизначеності характеризуються неповнотою

інформації про стан об'єкту управління внаслідок недоступності до спостережень деяких змінних, або внаслідок неконтрольованих зовнішніх впливів.

Показано, що управління складеними об'єктами в умовах невизначеності потребує виділення та використання знань у формі темпоральних залежностей. Такі залежності визначають допустимі послідовності управляючих дій та умови для виконання цих дій. Вони відповідають неформальним персональним знанням виконавців, що застосовуються при управлінні в умовах неконтрольованих зовнішніх впливів та не входять до складу моделі об'єкту управління.

Запропоновано принципи підтримки управління підприємством як складеним об'єктом в умовах невизначеності на основі темпоральних знань.

Розроблено темпоральну модель складеного об'єкту для управління в умовах невизначеності. Модель містить у собі темпоральні залежності між станами об'єкту управління з урахуванням значень змінних, які характеризують управляючі дії та контекст їх виконання у цих станах. Модель дає можливість підвищити ефективність управління складеним об'єктом в умовах невизначеності за рахунок формування управляючих дій на основі ймовірнісних темпоральних знань, що є формалізованим представленням досвіду досягнення цільового стану об'єкту управління на підприємстві.

Запропоновано метод підтримки циклу управління складеним об'єктом в ІУС в умовах невизначеності на основі темпоральних знань. Метод поєднує традиційний цикл побудови, конфігурування використання й адаптації апріорно заданої моделі комплексного об'єкту управління із формуванням та використанням бази темпоральних знань для оцінки поточного стану об'єкту та підтримки управління. Метод забезпечує підвищення ефективності управління в умовах неповноти інформації про стан об'єкту та неконтрольованих зовнішніх впливів шляхом використання актуалізованих темпоральних знань для формування найбільш ймовірних послідовностей управлінських дій щодо поточного стану об'єкту управління.

#### Список літератури:

1. *Sljivic S.* Management control in modern organizations/ S. Sljivic, S. Skorup, P. Vukadinovic //International Review, 2015, Vol. 4-5. — С. 39-49.
2. *Dechow, N.* (2007). Management control of the complex organization — relationships between management accounting and information technology/ N. Dechow, M. Granlund, J. Mouritsen. - Published in Chapman C., Hopwood A. & Shields M. (eds.) Handbook in Management Accounting Research. Oxford: Elsevier, 2007. - 625-640.
3. *Chala O.* Logical-probabilistic representation of casual dependencies between events in business-process management// Науково-технічний журнал, Сучасні інформаційні системи, 2018, Том 2, № 2. - С. 40-44.
4. *Levykin V.* Method of automated construction and expansion of the knowledge base of the business process management system/ V. Levykin, O. Chala // EUREKA: Physics and Engineering, 2018, Vol. 4. - P. 29-35.
5. *Kendal S.L.* An introduction to knowledge engineering/ S.L. Kendal, M. Creen. - London: Springer, 2007. — 290р.
6. *Чала О. В.* Побудова темпоральних правил для представлення знань в інформаційно-управляючих системах// Науково-технічний журнал, Сучасні інформаційні системи, 2018, Том 2, № 3. - С. 54-59.
7. *Левикін В. М.* Концепція автоматизованої побудови бази знань у системі процесного управління/ В. М. Левикін, О.В. Чала //Науково-технічний журнал «Біоніка інтелекту», 2017, № 2(89). С. 77-83.
8. *Чала О.В.* Принцип та метод еволюційної побудови бази знань на основі аналізу логів ІС процесного управління// Науково-технічний журнал «Біоніка інтелекту», 2017, № 1(88). - С. 80-84.
9. *Левикін В. М.* Розробка моделі багатоваріантного знання-емного бізнес-процесу// В. М. Левикін, О.В. Чала/ Вісник херсонського національного технічного університету, 2016, № 4(59). - С. 195-202.
10. *Левыкин В. М.* Модель знание-емкого бизнес-процесса для задач интеллектуального анализа процессов// В. М. Левыкин, О.В. Чала/ УСиМ, 2016, №6. - С. 59-66.
11. *Kalynychenko, O.* Implementation of search mechanism for implicit dependences in process mining/ O. Kalynychenko, S.Chalyi, Y. Bodyanskiy, V. Golian, N. Golian/ 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2013.
12. *Левикін В. М.* Модель жизненного цикла знание-емкого бизнес-процесса// В. М. Левикін, О.В. Чала/ Международный журнал «Управляющие системы и машины, 2017. № 1. — С. 68–76, 85.

Надійшла до редколегії 19.04.2018

УДК 004.89:510.635

А.Ю. Дорошенко<sup>1</sup><sup>1</sup>НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна, doroshenkoanastasiia@gmail.com

## РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ФАКТОГРАФІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

З швидким розвитком технологій — інформацію розглядають як один з основних ресурсів розвитку спільноти, а інформаційні системи та технології — як знаряддя удосконалення продуктивності праці та ефективності роботи особового складу. У будь-яких соціально-економічних та організаційно-виробничих системах — опрацювання та переробка інформації — найважливіша функція, без якої неможлива цілеспрямована діяльність. Обсяги і швидкість інформаційних потоків постійно збільшуються, тому підприємства все частіше звертаються до інтелектуального аналізу як засобу, який дає змогу отримувати корисні для підприємства відомості з величезної кількості інформації, що зберігається в корпоративних базах даних. Інтелектуальний аналіз допомагає досягти розуміння взаємовідносин з клієнтами і партнерами, основних показників роботи підприємства, а також отримати комплексне уявлення про компанію на всіх рівнях. Головним завданням є підвищення ефективності роботи бізнесу і його прибутковості, розширення ринку, зростання і досягнення поставлених цілей.

ПОШУК ІНФОРМАЦІЇ, ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ, ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ, ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ

**Дорошенко А.Ю. Разработка информационной технологии интеллектуального анализа фактографической информации.** С быстрым развитием технологий — информацию рассматривают как один из основных ресурсов развития общества, а информационные системы и технологии — как орудие совершенствования производительности труда и эффективности работы личного состава. В любых социально-экономических и организационно-производственных системах — разработка и переработка информации — важнейшая функция, без которой невозможна целенаправленная деятельность. Объемы и скорость информационных потоков постоянно увеличиваются, поэтому предприятия все чаще обращаются к интеллектуальному анализу как средству, которое позволяет получать полезные для предприятия сведения из огромного количества информации, хранящейся в корпоративных базах данных. Интеллектуальный анализ помогает достичь понимания во взаимоотношениях с клиентами и партнерами, основных показателей работы предприятия, а также получить комплексное представление о компании на всех уровнях. Главной задачей является повышение эффективности работы бизнеса и его прибыльности, расширение рынка, рост и достижения поставленных целей.

ПОИСК ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, ОБРАБОТКА ДАННЫХ

**Doroshenko A.Y. Development of data mining information technology of factual information.** With the rapid development of technology, information is considered as one of the main resources for the development of society, and information systems and technologies as an instrument for improving labor productivity and the efficiency of personnel. In any socio-economic and organizational-production systems — the development and processing of information is the most important function, without which purposeful activity is impossible. The volumes and speed of information flows are constantly increasing, therefore, enterprises are increasingly turning to intellectual analysis as a means of obtaining information useful for an enterprise from a huge amount of information stored in corporate databases. Intelligent analysis helps to achieve understanding in relations with customers and partners, the main indicators of the enterprise, as well as get a comprehensive picture of the company at all levels. The main task is to increase the efficiency of the business and its profitability, expand the market, grow and achieve its goals. Specific responsibilities often include offering their knowledge of development methodologies, project planning, analysis and management of new or upgraded information technology projects, including definition and evaluation of alternatives. This paper present a review about Intellectual Capital and Information Technology, showing relationship between these subject and outlines research method, based on a intellectual review approach. This work is a starting point for further research that aims to deepen the intellectual capital theory as a way to understand and share knowledge in IT projects. There are analyzed the problems of disparate text data processing. The problems of text data processing are highlighted. It is shown that the existing mathematical software and insufficient for the simultaneous solution of problems handling multiple text resources.

INFORMATION SEARCH, INFORMATION SYSTEMS, INFORMATION TECHNOLOGY, DATA PROCESSING

### Вступ

Сучасне життя неможливе без використання електронних інформаційних ресурсів в усіх сферах. Бурхливий розвиток мережевих інформаційних технологій, в тому числі Інтернету, сприяють значному збільшенню доступних інформаційних ресурсів та обсягів переданої інформації. Найчастіше це різнорідна, слабо структурована і надлишкова

інформація, що має високу динаміку оновлення. Необхідність ефективного використання цього колосального мінливого обсягу інформації обумовлює актуальність і значимість досліджень у галузі інтелектуальної обробки інформації.

Значна частина інформації подається у вигляді текстів природними мовами. У багатьох завданнях, наприклад, при обробці новин, або результатів

пошукової видачі наукових статей, кількість текстових документів, що вимагають обробки, є дуже велика. Тому велику значимість мають методи, що спрощують роботу з такими об'єктами.

Останнім часом значного поширення набувають нові технології та методи аналізу даних, зокрема методи інтелектуального аналізу, які використовують для виявлення прихованих закономірностей у великих масивах даних. Аналіз наукових робіт показав, що навіть при існуючому розмаїтті методів інформаційного пошуку проблема автоматизованого пошуку документів залишається недостатньо вирішеною.

### 1. Постановка задачі

Інформація, яка характеризує певний конкретний факт, фактографічну подію або їх сукупність, називається фактографічною. Безперервне накопичення текстових даних привело до необхідності розробки методів інтелектуального аналізу текстів для забезпечення ефективної роботи з великими корпусами текстів. Вся сукупність представлених на сьогоднішній день методів тематичного аналізу тексту можна розділити на дві великі групи: лінгвістичний аналіз та статистичний аналіз. Перший орієнтований на екстракцію смислу тексту за його семантичною структурою, другий – за частотним розподілом слів у тексті. Як правило, в реальних задачах обробки тексту використовується поєднання методик з обох груп з тим чи іншим акцентом.

Пропонована технологія орієнтована на аналіз документів жанру ділової прози, для якої характерні наступні особливості: обмеженість предметної області та мови документів, наявність суворої модельної ситуації (яка визначається характером автоматизації або призначенням Інформаційних технологій), чіткість функцій кожного повідомлення, що дозволяє сконцентрувати аналіз навколо найбільш значущих понять предметної області. Саме такі документи є найважливішими з точки зору комп'ютерної обробки для найрізноманітніших Інформаційних технологій.

Аналіз стану досліджень показав, що найбільш відомою технологією інтелектуальної обробки даних є інтелектуальний аналіз даних (Data Mining) [1]. Основна особливість Data Mining – об'єднання широкого математичного інструментарію і останніх досягнень в сфері інформаційних технологій, розроблених на основі штучного інтелекту, для організації процесу здобуття знань з потоку даних. До найбільш відомих підходів відносять системи на основі нейронних мереж [2], статистичних методів [3-8], нечіткої логіки, методів узагальнення за прикладами об'єктів [4-5] та ін., які забезпечують роботу в середовищах з різними типами даних

і можуть працювати з експертом, які не є програмістом.

Реалізація ефективного пошуку фактографічної інформації вимагає вивчення структури предметної області, знаходження її специфічних семантичних ознак. Розробка теоретичних і методологічних аспектів розробки комп'ютерного лінгвістичного забезпечення почалася ще в 60-і роки. Проблеми лінгвістичних засобів для технологій автоматичного аналізу тексту розроблені в працях таких вчених як Шапот М. [2], Гаврилова Т.А. [3], Загоровский И.М. [4], Калинина Е.А.[5], Чубукова И.А. [6], Бондаренко М.Ф. [7], Н.В. Шаронова [8], М.Я. Дворкіна [11] та ін.

Серед зарубіжних фахівців, які присвятили себе дослідженнями в області автоматизованої обробки інформації, слід відзначити: О. Corcho, M. Fernandez-Lopez, A. Gomez-Perez, M.C. Suárez-Figueroa, Ju. Apresjan, I. M. Boguslavsky, J. Makki, A.-M. Alquier., V. Princ, L. L. Iomdin, L. L. Tsinman, Buitelaar P., Cimiano P., Magnini B. та ін. [9-10, 16-21]. У роботах досліджено питання автоматизованого індексування текстової інформації. Особливо важливою і актуальною проблема автоматизації онтологічного інжинирингу в системах вилучення знань із текстової інформації. У зв'язку з цим інтерес представляють дослідження таких авторів як О. Corcho, A. Gomez-Perez [9-10].

Автор Шапот М. у своїх дослідженнях наводить приклади використання методів інтелектуального аналізу даних у фінансових додатках і маркетинговому аналізі [2]. Автор Чубукова І.О. описує життєвий цикл онтологій, він збігається з життєвим циклом розробки будь-якої програмної систем, природно, з урахуванням різних способів класифікації етапів життєвого циклу і їх назви [6].

Тенденція сучасних досліджень спрямована саме на впровадження в інформаційних системах лексичних знань. Ряд робіт, як наприклад [16,18,20], присвячені визначенню конкретних лінгвістичних шаблонів (patterns), специфічних для певної предметної галузі і забезпечують якісне виявлення в тексті релевантних даних. Багато робіт цього напрямку присвячені дослідженням «нейронної парадигми». Нейромережевий підхід використовується у величезній кількості завдань — для кластеризації інформації з мережі Інтернет, автоматичної генерації локальних каталогів, уявлення образів (в рекурсивних нейронних мережах). Серед тем, що активно вивчаються останнім часом — неоднорідні нейронні моделі з відносинами подібності. (Heterogeneous Neural Networks with similarity relation) [17-20].

Таким чином, метою даної роботи є розробка принципів побудови інформаційної технології

інтелектуального аналізу текстової інформації, яка дозволяє автоматизувати процес обробки слабо структурованих фактографічних ресурсів та вдосконалити процес екстракції знань за рахунок визначення ознак та атрибутів предметних областей. Відмінною рисою такого підходу є орієнтація використуваних лінгвістичних описів на конкретні предметні знання.

## 2. Результати

Розвиток інформаційних технологій забезпечив зростання кількості інформаційних ресурсів, більшість яких представлена у неструктурованому текстовому вигляді. Технологія, завдяки якій з'являється можливість формування анотованого опису інформаційних ресурсів, полягає в наступному:

– текст інформаційного ресурсу розділяється на окремі твердження, які описують ту чи іншу ознаку, ситуацію або дію;

– з онтології вибираються поняття, за допомогою яких проводиться опис змісту інформаційного ресурсу;

– обрані твердження перетворюються в триплети «об'єкт-атрибут-значення» з використанням концептів, описаних в онтології.

Будь-яка онтологія повинна ґрунтуватися на перевірених джерелах знань, а також передбачати повторне використання вже існуючих онтологій для того, щоб уникати дублювання інформації.

Позначимо  $\sigma = \{\sigma_0, \sigma_2, \dots, \sigma_6, \sigma_{num}, \sigma_{pers}, \sigma_{gend}\}$  – група іменника, де  $\sigma_0$  – початкова форма (іменник в називному відміннику);  $\sigma_2, \dots, \sigma_6$  – форми слова в родовому, давальному, знахідному, орудному та місцевому відміннику;  $\sigma_{num}, \sigma_{pers}, \sigma_{gend}$  – характеристики (число, особа і рід). Група дієслова (інфінітив, активний стан, пасивний стан, герундій, прийменник, характеристики – перехідне та неперехідне дієслово, а також союз) позначимо через  $\mu = \{\mu_0, \mu_{act}, \mu_{pas}, \mu_{grd}, \mu_{prep}, \mu_{trans}, \mu_{nt}, \mu_{conj}\}$ .

Розглянемо типові лінгвістичні шаблони, які зустрічаються у тексті, та можливі способи їх онтологічного подання. Наприклад, «літак приземлився», «вчений розробив прилад», «чашка розбилася», «знайти новини», «специфікація стандарту» та ін. Можна виділити наступні лінгвістичні шаблони фактографічного текстового ресурсу:

- (1)  $(\sigma_s, \mu_{act})$
- (2)  $(\sigma_s, \mu_{act}, \sigma_o)$
- (3)  $\sigma_s, \mu_{pas}$
- (4)  $(\sigma_s, \mu_i, \mu_{0j}), (\sigma_s, \mu_{0j}, \mu_i)$  або  $(\mu_{0j}, \mu_i, \sigma_o)$
- (5)  $(\sigma_s, \mu_i, \sigma_o), \mu_i \in Serv$
- (6)  $(\mu_0, \sigma_o)$
- (7)  $(\mu_{grd}, \sigma_o)$

- (8)  $(\sigma_s, \mu_{prep}, \sigma_o)$
- (9)  $(\mu_{iact}, \mu_{jprep}, \sigma_o)$  або  $(\mu_{ipas}, \mu_{jprep}, \sigma_o)$
- (10)  $(\sigma_s, \sigma_o)$
- (11)  $(\mu_{0i}, \mu_{jprep}, \sigma_o)$

Позначимо  $\Omega = (\Psi, \varepsilon, \zeta, \Phi)$  – це онтологія, де  $\Psi$  – множина об'єктів,  $\varepsilon$  – відношень,  $\zeta$  – множина допустимих атрибутів (які задаються ім'ям та типом), та  $\Phi$  – правил виведення,  $\Psi_s$ , де  $\Psi_o$  – суб'єкт та об'єкт відношення,  $\tilde{\varepsilon}$  – відношення успадкування. Тоді типові лінгвістичні шаблони матимуть відповідні онтологічні трактовки.

- (1) 1.  $\exists \varepsilon, \Psi_s \in \Omega \mid \exists \varepsilon(\Psi_s)$   
2.  $\exists \varepsilon, \zeta_i \in \Omega \mid \exists \Psi_s : \exists \varepsilon(\Psi_s) \wedge \zeta_i \in \Psi_s$
- (2)  $\exists \varepsilon, \Psi_s, \Psi_o \in \Omega \mid \exists \varepsilon(\Psi_s, \Psi_o)$
- (3) 1.  $\exists \varepsilon, \Psi_s \in \Omega \mid \exists \varepsilon(\Psi_s)$   
2.  $\exists \varepsilon, \Psi_o \in \Omega \mid \exists \varepsilon(\Psi_o)$   
3.  $\exists \varepsilon, \zeta_i \in \Omega \mid \exists \Psi_o : \exists \varepsilon(\Psi_o) \wedge \zeta_i \in \Psi_o$
- (4) 1.  $\exists \varepsilon, \Psi_s \in \Omega \mid \exists \varepsilon(\Psi_s)$   
2.  $\exists \varepsilon_i, \varepsilon_j, \Psi_s \in \Omega \mid \exists \varepsilon_i(\Psi_s) \wedge \exists \varepsilon_j(\Psi_s)$   
3.  $\exists \varepsilon, \zeta_i \in \Omega \mid \exists \Psi_s : \exists \varepsilon(\Psi_s) \wedge \zeta_i \in \Psi_s$
- (5) 1.  $\exists \varepsilon, \Psi_s, \Psi_o \in \Omega \mid \exists \varepsilon(\Psi_s, \Psi_o)$   
2.  $\exists \Psi_i, \zeta_j \in \Omega \mid \zeta_j \in \Psi_i$
- (6) 1.  $\exists \varepsilon, \Psi_o \in \Omega \mid \exists \varepsilon(\Psi_o)$   
2.  $\exists \varepsilon, \zeta_i \in \Omega \mid \exists \Psi_o : \exists \varepsilon(\Psi_o) \wedge \zeta_i \in \Psi_o$
- (7) 1.  $\exists \varepsilon, \Psi_o \in \Omega \mid \exists \varepsilon(\Psi_o)$   
2.  $\exists \varepsilon, \zeta_i \in \Omega \mid \exists \Psi_o : \exists \varepsilon(\Psi_o) \wedge \zeta_i \in \Psi_o$
- (8) 1.  $\exists \varepsilon, \Psi_s, \Psi_o \in \Omega \mid \exists \varepsilon(\Psi_s, \Psi_o)$   
2.  $\exists \Psi_i, \zeta_j \in \Omega \mid \zeta_j \in \Psi_i$   
3.  $\exists \varepsilon, \Psi_i, \Psi_j \in \Omega \mid \exists \varepsilon(\Psi_i, \Psi_j)$
- (9) 1.  $\exists \varepsilon, \Psi_o \in \Omega \mid \exists \varepsilon(\Psi_o)$   
2.  $\exists \varepsilon, \zeta_i \in \Omega \mid \exists \Psi_o : \exists \varepsilon(\Psi_o) \wedge \zeta_i \in \Psi_o$
- (10) 1.  $\exists \varepsilon, \Psi_i, \Psi_j \in \Omega \mid \exists \varepsilon(\Psi_i, \Psi_j)$   
2.  $\exists \Psi_i, \zeta_j \in \Omega \mid \zeta_j \in \Psi_i$   
3.  $\exists \varepsilon, \Psi_o \in \Omega \mid \exists \varepsilon(\Psi_o)$
- (11) 1.  $\exists \varepsilon, \Psi_o \in \Omega \mid \exists \varepsilon(\Psi_o)$   
2.  $\exists \varepsilon, \zeta_i \in \Omega \mid \exists \Psi_o : \exists \varepsilon(\Psi_o) \wedge \zeta_i \in \Psi_o$   
3.  $\exists \varepsilon_i, \varepsilon_j, \Psi_o \in \Omega \mid \exists \varepsilon_i(\Psi_o) \wedge \exists \varepsilon_j(\Psi_o)$

Особлива увага приділяється етапу перевірки онтології шляхом побудови семантичних дескриптивів документів та аналізу протиріч, оскільки він є критичним для всієї процедури побудови онтології та представляє основну відмінність запропонованого підходу в порівнянні з відомими методами, при цьому він є не незалежним етапом, а постійним процесом автоматичної корекції та верифікації, що запускається після кожного з етапів.

Вводиться метрика коректності для синтаксичного  $\rho_{syn}(w_i, w_j, \Omega_{syn})$  та семантичного зв'язку  $\rho_{sem}(\alpha_i, \alpha_j, \Omega_{sem})$ , яка показує, наскільки коректний побудований зв'язок між концептами  $\alpha_i$  та  $\alpha_j$ , та, відповідно, групами слів, які представляють їх в тексті,  $\{w_i\} \rightarrow \alpha_i$  и  $\{w_j\} \rightarrow \alpha_j$ .

Синтаксична коректність:

$$\rho_{syn}(w_i, w_j, \Omega_{syn}) = \begin{cases} 1, & \exists \varepsilon_{syn}(w_i, w_j) \in \Omega_{syn}; \\ -1, & \exists \bar{\varepsilon}_{syn}(w_i, w_j) \in \Omega_{syn}. \end{cases}$$

Тоді ступень коректності слова  $w_l$ :

$$\rho_{syn}(w_l) = \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{j=1}^{N_{D_i}^{w_j}} \rho_{syn}(w_l, w_j, \Omega_{syn})}{N_{D_i}^{w_j}}, \forall j: w_j, w_l \in T_{D_i}$$

Загальна синтаксична коректність концепту онтології:

$$\rho_{syn}(\alpha_l) = \sum_i \rho_{syn}(w_i), \{w_i\} \rightarrow \alpha_l.$$

Концепт онтології виключається у випадку, коли

$$\rho_{syn}(\alpha_l) \ll \frac{\sum_{j=1}^{N\alpha_l} \rho_{syn}(w_j)}{N\alpha_l}, \quad \forall j \neq l,$$

$N\alpha_l$  – число документів, у яких присутній концепт онтології. Коефіцієнти  $\rho_{syn}(w_j)$  для решти термінів перераховуються без врахування  $\{w_l\} \rightarrow \alpha_l$ . У випадку декількох альтернатив термін  $\alpha_i^m$  вважається надійним, якщо

$$\rho_{syn}(\alpha_i^m) \gg \rho_{syn}(\alpha_i^j), \forall i \neq m, i = \overline{1, N\alpha_l}.$$

Аналогічно, семантична метрика концепту  $\alpha_l$  на основі слів, які його представляють  $\{w_l\}$ , розраховується, як

$$\rho_{sem}(\alpha_l) = \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{j=1}^{N_{D_i}^{w_j}} \rho_{sem}(\alpha_l, \alpha_j, \Omega_{syn})}{N_{D_i}^{w_j}},$$

$$\forall j: \{w_j\} \rightarrow \alpha_j, w_j, w_l \in T_{D_i}$$

Вклад концепту в розуміння документу:

$$K_{sem}(\alpha_l, D_i) = \frac{\sum_{j=1}^k \rho_{sem}(\alpha_l, \alpha_j, \Omega)}{k},$$

$$\forall j: w_j, w_l \in T_{D_i}, \{w_j\} \rightarrow \alpha_j, \{w_l\} \rightarrow \alpha_l$$

Термін розуміється незадовільно та погіршує загальне розуміння тексту у разі:

$$\sum_{i=1}^N K_{sem}(\alpha_l, D_i) \ll 0.$$

Запропонований підхід до автоматизованої побудови онтології дозволяє домогтися наступних основних переваг в порівнянні з існуючими методами:

1. Не потрібна побудова початкової онтології предметної області людиною-експертом в якості базису для подальшої роботи.

2. Не потрібна попередня обробка людиною-експертом документів предметної області (включаючи стандартизацію шаблонів, перетворення форматів, попередню розмітку тексту, складання вручну словника термінів предметної області та ін.).

3. Процес побудови онтології повністю прозорий для користувача, обґрунтування усіх рішень, що приймаються, логіка та оцінка можуть бути простежені.

4. Процес побудови онтології не залежить від язика документу, за винятком підтримки синтаксичних онтологій для різних мов.

5. Процес побудови онтології ітеративний, завжди існує зворотний зв'язок з можливістю перевірити семантику онтології, яка згенерована автоматичним шляхом, коли вже побудована частина онтології сама є основою для аналізу семантичної коректності запропонованих змін та доповнень. При цьому процес саморегулювання автоматизовано й може обходитися без людини-експерта.

6. Аналіз та ви členення термінів з врахуванням їх семантики відбувається у рамках всього корпусу текстів, він не обмежується аналізом індивідуальних пропозицій.

7. Алгоритм може працювати як автономно, так и в інтерактивному режимі, причому користувач може вплинути на формування рішення на кожному з етапів роботи.

Технологія фактографічного пошуку заснована на представленні змісту тексту у формі семантичної мережі. Семантична мережа містить значимі слова і словосполучення, які зв'язані одне з одним різними типами синтактико-семантичних зв'язків. Елементарна семантична мережа представляє результат синтаксичного аналізу та постсинтаксичних трансформацій дерева синтаксичних залежностей між словами у окремих реченнях. Повна семантична мережа тексту є сукупністю окремих семантичних мереж, які відповідають реченням.

Пошук факта – це пошук у семантичній мережі тексту такої підмережі, яка є ізоморфною до одного з шаблонів. Якщо підмережа знайдена, факт вважається встановленим, після чого здійснюється вилучення сутностей та їх маркування ролями, які задані у відповідних вузлах лінгвістичного опису.

Схему розробленої інформаційної технології представлено на рисунку.

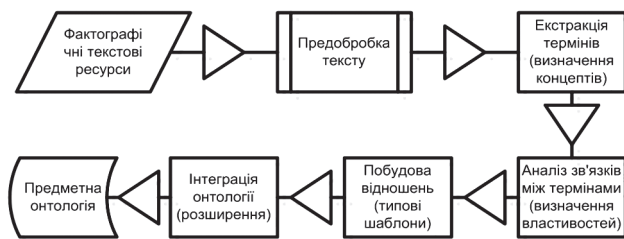


Схема інформаційної технології інтелектуального аналізу фактографічної інформації

Реалізація — створення онтології з допомогою деякого формального мови опису (OWL, OIL, RDF, SPARQL і т.д.) на основі концептуальної моделі. Ми пропонуємо використовувати мови сімейства OWL (OWL, OWL 2) як такі, що найбільш розвинену семантику.

Технологія METHONTOLOGY пропонує використовувати фреймових системи або дескриптивні логіки. Їх пропозиція узгоджується з нашою рекомендацією по використанню мови OWL, тому що дескриптивна логіка SHOIN (D) закладена в його основу.

Технологія On-To-Knowledge пропонує формалізувати концептуальну модель з використанням мови OIL, при цьому продовжувати процес виявлення знань (яким чином — не уточнюється) для збагачення онтології деталями і менш значущими концептами і відносинами.

У технології Enterprise Model Approach дається посилання на думку Грубера [18], з якого випливає, що стадії виявлення знань (в яку входить концептуалізація) і реалізації можна об'єднати. Однак сам автор вважає, що будь-яка методологія, яка об'єднує ці дві стадії повинна давати серйозне обґрунтування такого кроку.

У будь-який довільний проміжок часу будь-який кінцевий користувач може звернутися до створеної онтології. В результаті своїх дій він повинен отримати достовірні і актуальні дані. Основним дією цієї стадії є повноцінне і своєчасне зміна онтології відповідно до змінами реального світу. Онтологія повинна еволюціонувати, для чого процеси поновлення-видалення-вставки вимагають строгих правил, що є основою процесу супроводу.

Основою інформаційної технології семантичного пошуку є застосування семантичних мереж, які характеризують значення слів людської природної мови та зв'язки між уявленнями, що окреслюються ними. Не досить опрацьовано і слабо виражено застосування підтримки української морфології. Семантична мережа словника мови включає близько 40 тисяч семантичних груп в базовому варіанті. Це дозволяє користувачу вводити запит природною мовою і система сама організовує пошук всіх документів, контекст яких збігається з

контекстом користувацького запиту. Застосування семантики дозволяє враховувати загальний контекст документа.

Таким чином, інформаційна технологія інтелектуального аналізу фактографічної інформації удосконалює та доповнює існуючий підхід обробки текстових даних і не суперечить існуючій практиці, що свідчить про його практичну цінність та ефективність використання.

## Висновки

У статті проаналізовано існуючі інформаційні технології, моделі та методи обробки фактографічних даних у слабо структурованих текстових ресурсах, сформульовано основні вимоги до розробки інформаційної технології інтелектуального аналізу фактографічних ресурсів. Враховано особливості інтелектуального аналізу фактографічної текстової інформації. Сформовано підхід до видобування фактографічних даних з текстових джерел на основі використання онтологічних специфікацій. Описано використання онтологій для опису процесів інтеграції фактографічної інформації. Запропоновано використання нового напівавтоматичного методу, оснований на принципах обробки природної мови, для розбудови та розширення базової предметної онтології. Запропонований підхід до автоматизованої побудови онтології дозволяє удосконалити та доповнити існуючий підхід обробки текстових даних, що свідчить про його практичну цінність та ефективність використання.

Доцільно використання отриманих результатів у розробці систем, які здатні забезпечити розв'язання задач поділу на частини, виділення ключових слів та опрацювання множини документів. Особливо це актуально для наукових установ та бібліотек.

## Список літератури:

1. Оперативна аналітична обробка даних: концепції і технології [Електронний ресурс] / Іванівський держ. енергетичний ун-т. — Режим доступу URL: [http://citforum.ru/seminars/cis99/sch\\_03.shtml](http://citforum.ru/seminars/cis99/sch_03.shtml) — 2009. — Загл. з екрану.
2. Шанот М. Інтелектуальний аналіз даних в системах підтримки прийняття рішень [Текст] / М. Шапот // Журн. відкриті системи. — 2008. — №1. — С. 30-35.
3. Гаврилова Т.А. Бази знань інтелектуальних систем [Текст]: навч. / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевський. — СПб: Пітер, 2000. — 384 с.
4. Загорювський І.М. Вибір алгоритму навчання в системах придбання знань з даних [Текст]: матеріали 12-ої націонал. конф. зі штучного інтелекту з міжнар. участю (КВІ 2010), — М.: Физматлит, Т. 1, 2005. — С. 131-135.
5. Калініна Е.А. Застосування технології Data Mining для автоматизованої побудови баз знань інтегрованих експертних систем [Текст] / Е.А. Калініна, Г.В. Рибіна.: матеріали 8-ої націонал. конф. зі штучного інтелекту з міжнар. участю (КВІ 2002), — М.: Физматлит, Т. 1, 2002.



- С. 119-127. **6.** Чубукова І.А. Data Mining [Текст] / І.А. Чубукова. — М.: БИНОМ. Лабораторія знань, Інтернет-університет інформаційних технологій — ІНТУІТ.ру, 2008. — 384 с. **7.** Бондаренко, М. Ф. Теорія інтелекту [Текст]: навч. / М.Ф. Бондаренко, Ю.П. Шабанов-Кушнарєнко. — Харків: Компанія СМІТ, 2006. — 576 с. **8.** Шаронова, Н.В. Автоматизовані інформаційні бібліотечні системи: завдання обробки інформації [Текст]: монографія, Нар. Укр. Акад. / Н.В. Шаронова, Н.Ф. Хайрова; [Каф. інформац. технологій і документознавства]. — Х., 2003 — 120 с. **9.** Gomez-Perez A. Ontological Engineering: what are ontologies and how can we build them [Текст] / O. Corcho, M. Fernandez-Lopez, A. Gomez-Perez, // In Cardoso (ed) Semantic Web: Theory, Tools and Applications. — IDEA Group. — 2007. — Pages 44-70. **10.** Suárez-Figueroa, How to write and use the Ontology Requirements Specification Document [Текст] / M.C. Suárez-Figueroa, A. Gómez-Pérez, Boris Villazón-Terrazas // Proceedings of the 8th International Conference on Ontologies, DataBases, and Applications of Semantics (ODBASE 2009). — ISBN: 978-3-642-05150-0. LNCS 5871. — Volume: Part II. — 2009. — Pages: 966-982. **11.** Дворкіна М. Я. Бібліотечне обслуговування: нова реальність / М. Я. Дворкіна. — М.: МГУКИ, 2000. — 48 с. **12.** Воронцов А. В. Гібридні алгоритми лексико-граматичного аналізу тексту / А. В. Воронцов // Штучний інтелект. — 2006. — № 4. — С. 593-602. **13.** Corcho O. Methodologies, tools, and languages for building ontologies. Where is their meeting point? / O. Corcho, M. Fernandez-Lopez, A. Gomez-Perez // Data & Knowledge Engineering, 46, 2003. **14.** Єрмаков А.Е. Автоматизація онтологічного інжинірингу в системах добування знань з тексту / А. Е. Єрмаков // праці Міжнародної конференції Діалог'2008. — Москва, Наука, 2008. — С. 136-140. **15.** Канищева О. В. Використання методів Data Mining і Text Mining для обробки текстової інформації в інформаційних системах / О. В. Канищева, Сайед Мохаммад Таухид Сіддікі, Н. В. Шаронова // Біоніка інтелекту. — Харків: ХНУРЕ, 2005. — № 2 (63). — С. 22-26. **16.** Apresjan Ju. Lexical Functions in NLP: Possible Uses / Ju. Apresjan, I. M. Boguslavsky, L. L. Iomdin, L. L. Tsinman // Computational Linguistics for the New Millenium: Divergence or Synergy? : proceedings of the International Symposium held at the Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. — Frankfurt am Main, 2002. — P. 55-72. **17.** Buitelaar P. Ontology Learning from Texts: An Overview. / Buitelaar P., Cimiano P., Magnini B. In Ontology Learning from Text: Methods, Evaluation and Applications, 2005, Vol. 123, Eds. IOS Press. P. 634.-265. **18.** Simperl E. Achieving Maturity: the State of Practice in Ontology Engineering / E. Simperl, M. Mocho // In International Journal of Computer Science and Applications, Technomathematics Research Foundation Vol. 7 No. 1, pp. 45-65, 2010. **19.** Makki J. Semi Automatic Ontology Instantiation in the domain of Risk Management / J. Makki, A.-M. Alquier., V. Prince // In IFIP, Advances in Information and Communication Technology. 2008. Volume 288. p. 254. **20.** Buileaar P. Topic extraction from scientific literature for competency management [Текст]: / Buileaar P., Eigner T. In The 7th International Semantic Web Conference PICKME 2008, 27 octobre Karlsruhe, Germany, p. 55-67. **21.** Zhou, L. Ontology Learning: State of the Art and Open Issues/ Zhou, L. Information Technology and Management, 2007, 8(3), p. 241-252.

Надійшла до редколегії 07.06.2018

---

## RESUME

---

Volodymyr Shyrov

EVOLUTION AS UNIVERSAL NATURAL LAW  
(PROLEGOMENA TO THE FUTURE GENERAL EVOLUTION THEORY)  
PART 3

In the second part of the work evolutionary aspects of human society are described, which are based on the complexity theory. Theoretical and factual data are presented on population dynamics as an evolutionary factor. It is emphasized that from the 80-90s of the last century the era of the so-called Demographic transition came and the parameter "population size" ceased to play the role of an evolutionary factor.

The analysis of evolutionary aspects of the financial stages of the Production mechanism is carried out, namely, the actual financial, financial-information and financial-information-network. A brief chronology of the marked stages is given and their interpretation is presented. The measures of complexity for the above three stages of the Production mechanism are proposed and it is shown that the present stage is characterized by an exponential increase in complexity. The notion of parasitic complexity is introduced, the model is proposed and the efficiency of the world financial system built on the dollar for the period 1971–2016 is given. Thus, it is demonstrated that the evolutionary theory of complexity gives a quite adequate explanation of the causes of crises in the modern world.

It is demonstrated that due to the uncontrolled growth of the complexity of modern financial-information-network mechanism the world is increasingly sliding into a global crisis. This crisis is of an ontological nature and can not be resolved by palliatives. However, palliative measures can slow down the slide into a crisis and provide the time necessary to find and develop principal decisions.

In this paper, from the standpoint of the theory of evolutionary complexity, the "doctrine of controlled chaos" is analyzed, and possible other options for combating crises are also presented. Among these options, the most promising are the options associated with managed complexity, scientific and technological innovation and quantum information. From the standpoint of the theory of evolutionary complexity, the hypotheses of technological singularity and transhumanism are analyzed.

The author draws attention to the danger that uncontrollable development of critical phenomena brings the world to a global catastrophe.

The author considers it necessary to create a universal international transdisciplinary research institution in this field and organize research on the general theory of the evolution and its applications.

---

Ivan Bozhko, Grygoriy Chetverykov, Yaroslav Kolisnyk

### THE Q# PROGRAMMING LANGUAGE INVESTIGATION

**Background.** Nowadays the research of quantum computing takes place by scientists and technological companies. There are new tools appearing as well as new articles published on the quantum computing topic. Since the tools are new and have not been tested and used, the problem of understanding the specifics of each of them also takes place, hence the authors try to resolve in the given paper.

**Materials and methods.** For the current research the literature analysis was used for retrieving the information about the tools being investigated. For modeling test Q# algorithms a computer with Microsoft Quantum Development Kit was used.

**Results.** As per the investigation, it can be seen that Q# language today is a unique tool provided as a part of Microsoft Development Kit with the standard instruments for quantum programs creation included. It integrates with other .NET technologies, which provides the ways of creating quantum programs as parts of classic programs. Also, the way of writing programs via Q# differs from the classic programming languages, which provides the flexibility of creating quantum programs without additional code for making requests and so on by means of having special quantum types and standard functions.

**Conclusion.** According to the goals of the investigation, the high-level overview of the currently existing tools including Q# language was provided, but the research requires continuation in order to provide more detailed results of practical usage of the tool (e.g. implementation of one of the quantum algorithms). Another direction of the investigation could be explicit comparison of the same algorithm implemented using different tools and, therefore, comparing the efficiency of them.

---

M.Yu. Vyshniak, I.N. Klymova

### THE BASIC ISSUES OF KNOWLEDGE MANAGEMENT BIONICS

**Background:** Despite the fact that knowledge management is a powerful tool for increasing competitiveness, and research in this field has been conducted for more than 25 years, yet still practical applications do not meet expectations. The core of the reasons is the ignoring of an integrated approach that takes into account the person peculiarities in working with information and knowledge. The aim of the work is to find the basis for constructing systems that will better meet the expectations from knowledge management than existing ones. Such a basis is composed by a set of basic provisions (axioms).

**Materials and methods:** An analysis was made of the results of research conducted by many scientists and practitioners in the field of knowledge management and a number of other areas such as psychology, artificial intelligence, business organization, information systems and technologies, adult education, etc. From these areas, relevant regularities were extracted which explain the existing difficulties and allowed to formulate the main provisions for the further development of knowledge management.

**Results:** Sixteen key provisions (axioms) are formulated and commented on, which present a platform for further research and in-depth analysis of previously obtained results. Axioms reflect peculiarities of a human as a bio-cybernetic system and allow these features to be taken into account in knowledge management.

**Conclusion:** The axioms given in the article refer exclusively to knowledge management. Their totality makes it possible in research to rely on the features of knowledge to manage knowledge, not something else, and to receive results from the management of this particular object, and not some other.

---

K.V. Nosov, Y.G. Bespalov, O.V. Vysotska, H.M. Strashnenko, E.S. Ivanova

### MODELING THE COLORIMETRIC PARAMETERS OF MICROCOSMS TO IMPROVE THE OPERATION MODES OF TEST MICROECOSYSTEMS

**Background:** Improving the operating modes of test microecosystems by eliminating the masking effect of the microcosm surface variegation on colorimetric signs of toxicity is an important scientific and practical task.

**Materials and methods:** Modeling is carried out on the basis of the actual material of images, which is located on the Internet of the simplest algal communities and processed using the MathLab package. Discrete models of dynamic systems (DMDS) is performed using the Spearman correlation coefficient and an approach based on an extended interpretation of the Liebig law.

**Results:** An idealized system trajectory was obtained with the help of discrete models of dynamic systems. It reflects many non-recurring combinations of colorimetric parameters of the microcosm surface. A working hypothesis about systemic colorimetric parameters that preserve the relative stability of their values was formulated by analyzing the type of idealized trajectory of the system. As a result of the work, the image of the test microecosystems was processed with the designation by conventional colors of segments with different values of system colorimetric parameters. A visual assessment of the homogeneity of the colorimetric parameters of the microcosm image was conducted.

**Conclusion:** In the future, this will increase the effectiveness of the test microecosystems use in real situations – by eliminating the masking effect of the microcosm surface diversity on colorimetric signs of toxicity.

---

Marhina Anna, Mazurova Oksana, Shirokopetleva Mariya

### DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL PLANNING MODEL IN BUDGET MANAGEMENT SYSTEM

**Background:** Mathematical models play a decisive role in the creation of management systems in semi-structured areas. Competent management and budget planning requires not only the accounting of economic indicators, but also the use of appropriate methods for constructing optimal plans for achieving a particular financial goal. Models of optimization tasks and planning tasks are an important component in the construction of budget management systems.

**Materials and methods:** The hierarchical planning and utility theory were used in this work. Authors proposed to create hierarchical plans as series of deposits. Deposits with person's active incomes and expenditures allow the person to obtain additional passive income for long-term savings. It was proposed to select the optimal plan based on the linear additive convolution with weight coefficients.

**Results:** In this article was proposed mathematical model of the cost planning problem with elements of optimization. This model takes into account personal income and expenses of a person, possible ways of obtaining new

income, and also allows finding the best plan for achieving a financial goal. An algorithm for constructing plans for achieving a financial goal has been developed. Criteria for assessing the quality of plans based on the model were proposed.

**Conclusion:** In this article was proposed a model of the planning task and algorithm, which, are a mathematical support for software management systems, will expand their functionality. Substantially new in the work is the use of the concept of passive income as the basis for building plans for achieving a financial goal. The developed model and algorithm are approved at creation of the personal budget management system.

---

**S.G. Udovenko, V.A. Zathev, O.V. Teslenko**

**SIMULATION OF MIMO- DATA TRANSFER SYSTEMS  
IN INFOCOMMUNICATION NETWORKS**

**Background:** The advantages of modern infocommunication technologies include the possibility of increasing the bandwidth, capacity and reliability of the network in parallel with the increase in the number of transmitting and receiving antennas. Due to their capabilities, these technologies have remarkable prospects, but should be constantly improved. Therefore, the issue of their research, in particular modeling of data transmission networks, should be given due attention. In systems of MIMO that have become widespread in communication networks, different methods and algorithms operating on the principle of spatial - temporal coding are used. It is expedient to conduct a study of the capabilities of a wireless network model implemented with the help of MATLAB and the Alamouti spatial and temporal coding method. This will, in particular, provide guidance on determining the rating and bandwidth of communication networks under different data transfer conditions.

**Materials and methods:** In this paper the problem of modeling of multichannel infocommunication networks is considered. For research purposes, a wireless network model was implemented that was implemented using MATLAB tools and the Alamouti spatial - temporal encoding method. The purpose of the simulation was to study the effect of packet size on such characteristics of the functioning of the wireless MIMO system - the data transmission network as a system rating and the performance of the wireless network. To study the model, the following input parameters were selected: frame size - 300 bytes and 3000 bytes; SNR is 10 dB.

**Results:** The paper presents the results of the study of the impact of packet sizes on the characteristics of the MIMO system for data transmission in infocommunication networks with the admissible combination of transmitters and receivers. The results of the simulation will allow obtaining recommendations for determining the rating and bandwidth of communication networks in different conditions of data transmission.

**Conclusion:** The paper presents the results of the study of the influence of packet sizes on the characteristics of the MIMO system for data transmission in infocommunication networks with the admissible combination of transmitters and receivers. For research purposes, a wireless network model was implemented that was implemented using MATLAB tools and the Alamouti spatial - temporal encoding method. The conducted studies on rating and bandwidth of the MIMO system have shown that the transition from the SISO system to the MIMO system increases the bandwidth and significantly increases the rating system.

---

**Zoriana Rybchak**

**METHODS AND MEANS OF MODELING THE PLAN FOR PRIORITY RE-PAIR  
OF ROADS WITHIN THE TERRITORIAL COMMUNITY.**

In this paper, the simulation of the repair of the roads of the territorial community is considered in the presence of funds and depending on the condition and coverage of roads, their subordination and budget. It is proposed to use the modification of the PrimA algorithm.

Today, this task becomes relevant, since the process of forming communities and their development is an important task. Within the territorial community there are important administrative buildings, hospitals, schools, etc. Therefore, getting to these establishments within the community is a significant problem, given the state of the roads, since a significant part of the roads are in an unconditional state. It is proposed to solve the classical problem of finding the mini-mum span tree taking into account the specifics of the subordination of roads, the state and the coverage of roads, and the budget.

An example of using the proposed approach within the David community is given.

The article modifies Prim's algorithm in such a way that it is possible to effectively use the existing means for repairing roads taking into account their state and importance.

The obtained results of the modification should be used for the created capable territorial communities. The article has a theoretical and practical significance.

---

**M.V. Sidorov**

**THE METHOD OF TWO-SIDED ITERATIONS IN THE NUMERICAL ANALYSIS OF THE FIRST BOUNDARY VALUE PROBLEM FOR A SYSTEM OF SEMILINEAR ELLIPTIC EQUATIONS**

**Background:** The first boundary value problem for systems of semilinear equations of elliptic type is often encountered in problems of mathematical modeling of stationary processes in various nonlinear media. The development of new, as well as the improvement of existing numerical methods for solving such problems is an urgent scientific problem.

**Materials and methods:** To obtain the results, the Green's function method, the Green-Rvachov's quasi-function method, and also the methods of the theory of nonlinear operators in semi-ordered spaces, in particular, the results of V.I. Opoicev on the solvability of nonlinear operator equations with a heterotone operator.

**Results:** To find a positive solution to the homogeneous first boundary value problem for a system of semilinear elliptic equations, based on the transition to an equivalent system of nonlinear integral equations by the Green's function method or by the Green-Rvachov's quasi-function method, a two-sided iteration method is constructed. A number of conditions have been obtained that guarantee the existence of a positive solution to the system under consideration and two-sided convergence of the constructed iteration sequences to it.

**Conclusion:** The proposed iterative method for solving the first boundary value problem for a semilinear elliptic system can be used in mathematical modeling of processes in nonlinear media, and also extended (in combination with the Rothe method) to problems for non-stationary systems of semilinear equations.

---

**Oleksiy Povzun, Sergiy Podkopayev, Valeriy Kalynychenko, Svitlana Virych**

**MATHEMATICAL MODELING OF THE SYSTEM "TAR – POLYMER-FILLER»  
BY MEANS OF THE SYSTEM OF COMPUTER ALGEBRA MAPLE**

The analysis of mathematical modeling of various technological systems "coal tar-polymer" and "coal tar-polymer-active disperse filler" has been made. Considered various methods of development of mathematical models: the regression analysis, the program language MATHCAD with using a SURFER package for Windows, the STAGRAPHICS Plus programs, experimentally-statistical modeling method etc. In this paper we used Maple computer algebra system.

Polymer wastes for the production of polyvinyl chloride were used for the study. Active disperse filler – the vat remains of cleaning of a distillation of phthalic anhydride.

Factors of variation were the conditional viscosity of tar, the mass concentration of polyvinyl chloride, mass concentration of the vat remains of cleaning of a distillation of phthalic anhydride. The parameters optimization were: optimum contents knitting in mix, temperature of the softening knitting, elasticity knitting, strength at compression of concrete on modified knitting at 20°C, 50°C and 0°C, concrete water resistance coefficient on modified knitting at long water saturation, the relation of tension of shift of the established current knitting to tension.

For optimization of the "coal tar-polyvinylchloride-the vat remains of cleaning of a distillation of phthalic anhydride" system the composite asymmetrical plan at three integer levels has been used (-1; 0; +1) with coefficient of correlation of  $r_{ij} \leq 0,10$ , where  $i, j = 1, 2, 3$ . Optimum structures of the considered system defined as optimum areas of admissible values of factors of variation.

The regression equations are received. Values of factors of variation and boundary values of functions of a response are specified. In the graphic editor of the Maple system three-dimensional surfaces of parameters of optimization are constructed. The most characteristic surfaces of functions of a response are surfaces for such parameters of optimization: optimum contents knitting in mix, temperature of softening and elasticity of knitting.

Areas of admissible values of optimum mass concentration of polymer and active disperse filler in coal knitting various viscosity which correspond to boundary values of functions of a response are defined by the system of computer algebra Maple.

---

A.P. Safonyk, I.M. Targoniy, S.A. Koval

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ  
ЕЛЕКТРОКОАГУЛЯЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД**

**Background:** The task of developing a mathematical model and automation of wastewater treatment by the electrocoagulation method is solved. This contributes to improving the quality of treated effluents and reducing economic costs to achieve specified values of pollution concentrations. The aim of the work is to develop a model of the electrocoagulation process for water treatment, which takes into account the processes occurring in the reactor, compare the results with experimental data to verify the accuracy of the proposed model. Investigate the effect of current strength on the quality of wastewater treatment. Develop an automation system that will provide optimal process control while ensuring the energy-saving mode of the unit.

**Materials and methods:** In the work were used methods of mathematical physics and hydrodynamics to construct a mathematical model of the fluid purification process, general approaches to constructing model problems in which some components dominate over the other. Mathematical model of the process of electrocoagulation purification of waste waters is constructed taking into account the geometric dimensions of the reactor, the volumetric flow rate of liquid and the applied current strength. A method for determining the regulator settings for the controller based on experimental data is developed. The influence of the main parameters of the process on the quality of purification using simulation modeling in Simulink application of Matlab is studied. The functional scheme of automation with the matched complex of technical means of leading firms of manufacturers is constructed. Developed control software for Siemens controller in Simatic Step7 Manager software environment and a PC-to-PLC connection is configured for the human-machine interface.

**Results:** Mathematical model of electrocoagulation treatment of water, which describes the processes taking place in the reactor-cleaner is developed. The influence of the current intensity on the concentration of the target component at the exit from the reactor using a simulation model was studied. An automated system for the control of concentration of nickel ions with an algorithm for minimizing power consumption for the installation was developed. Provides control of the system in real time using the SCADA-system WinCC Flexible.

**Conclusions:** Based on the experimental data verified the adequacy of the constructed model. An automation system that provides the optimal power consumption while observing ecological norms, with respect to permissible concentrations of heavy metal ions, is proposed. The developed system allows to perform operational dispatch control through the SCADA-system.

---

O.G. Rudenko, O.O. Bezsonov, O.S. Romanyk

**ABOUT ONE ALGORITHM OF TRAINING THE NEURAL NETWORK  
IN THE PROBLEM OF THE TIME SERIES PREDICTION**

**Background:** Until recently, the main approach to solving the prediction problem was the statistical approach. In the framework of static models, the tasks of forecasting, the identification of hidden periodicity in data, analysis of dependencies, risk assessment in decision making, and others are solved. The general disadvantage of statistical models is the complexity of choosing the type of the model and selecting its parameters. Computing intelligence methods, among which artificial neural networks should be considered at first, can serve as alternative methods of statistical methods. The ability of the neural network to comprehensively process information follows from their ability to generalize and isolate hidden dependencies between input and output data. Significant advantage of neural networks is that they are capable of learning and generalizing the accumulated knowledge.

**Materials and methods:** In this paper we consider the prediction of time series by means of neural networks. When using the structure of the model that is not adequate to structure of the dynamic process, the question of the neural network training remains open. If in such approach to the multistep forecast inputs are used from own prediction of the neural network, obtained on previous steps, the quality of such a forecast will be low.

Another approach to the introduction of dynamics in a feedforward neural network is the addition of internal recurrence connections into the latent, input or output layers of the neural network. In order to determine the influence of past cycles on the current result, the calculation of special dynamic derivatives by means of "recurrent learning in real time" or "back propagation in time" is introduced. Adjustment of the neural network weights is also done by the gradient algorithm.

**Results:** The paper presents the results of research on the properties of a gradient learning algorithm for multi-layer perceptron. The simulation results confirmed that the proposed method of training the neural network can significantly improve the accuracy of prediction of time series.

**Conclusion:** The conditions of convergence of the proposed algorithm for training the neural network and expression for the optimal value of the convergence parameter, which provides the maximum learning speed, are obtained. Conditions of convergence for a regularized learning algorithm are determined. It is shown that there is a possibility to determine the value of the optimal parameter of regulation, which is variable in time, by minimizing some, in particular, the quadratic functional. The obtained results proved that it is expedient to use a constant parameter of regularization, the value of which depends on the required accuracy of the solved problem.

---

**O.V. Kuznetsov, L.E. Chala, S.G. Udovenko**

#### **NEURAL NETWORK DATA CACHING METHOD**

**Background:** In modern information systems, slow program operations are often used, the results of which it is advisable to store for some time. This allows you to quickly provide users with pre-stored data. The main purpose of caching for web servers is to reduce the time it takes to receive content so that the user can obtain the necessary data as quickly as possible. An important problem in ensuring the effectiveness of caching methods is taking into account the factor of data aging. If you do not control the data storage mechanism, then useful data flows can be blocked for many clients. Therefore, an important task is to determine the relevance and duration of storage of the managed data. Considering the constant growth of capacities used to support the operation of information systems, it is advisable to use neural network methods to solve caching problems.

**Materials and methods:** Neural network from Encog Machine Learning Framework is used in this work. Test informational system written with Java 1.8 was used to prove the concept. The data is stored in PostgreSQL 10.4 database. Neural network is studying and working in separate micro service. REST queries are used to communicate between the test system and neural network service.

**Results:** Analysis of existing methods of caching was performed. Different ways of saving cached data were elaborated. Proof of concept project that uses neural network to predict the time cache data is needed was analyzed. Such approach allows determining the time of living for cache and the time to fulfil the query beforehand.

**Conclusion:** The new type of caching based on neural network is proposed in this article. Based on proof of concept project analysis such method will be effective with high-loaded systems. The neural network caching method also solves the problem of Belady's caching algorithm.

---

**A.G. Kislaiia, L.E. Chala, O.Y. Grynova**

#### **BOT DETECTION IN SOCIAL NETWORKS**

**Background:** Nowadays, users gather a lot of information from social networks such as Twitter and Facebook. In such networks, social bots have become very popular. These are programs that mimic the behavior of ordinary users. Such programs enter into the trust of real people, and are given the opportunity to directly influence information received by a person, thereby manipulating his wishes and attitudes. Such bots can be very difficult to detect, as they use more and more advanced masking techniques to behave as ordinary people. These bots can be used in political, trade propaganda. We need to learn how to block bots before they can do harm, and neural networks can be offered as an effective method for detecting bots.

**Materials and methods:** In this paper, the LSTM neural network with the ReLU activation function is used. For training the neural network and data collection an information system written in Java 1.8 is used. For data gathering the author's Twitter library hbc is used. It accesses the Twitter API using REST requests. As a source with the source code of the neural network, the Deeplearning4j library is used. Data is stored in MySQL 5.6 database.

**Results:** The types of social bots, their harmful effects on users, as well as simple signs by which bots can be calculated are considered. The methods of ranking information by social networks are analyzed. The architecture of the proposed neural network is described, as well as the results of its work for analyzing the Twitter user profiles and users tweets.

**Conclusion:** The article proposes a neural network architecture based on the LSTM recurrent neural network. The results of network accuracy suggest that the proposed network can do a good job with the real task of identifying bots in social networks.

---

K. E Petrov, I.V. Kobzev

### FORECASTING PREFERENCES OF USERS BASED ON THE ANALYSIS OF THEIR ACTIONS

**Background.** Modern e-commerce actively uses recommender systems to solve problems of targeted promotion of goods and services, pay attention to specific user preferences. The main source of information about user preferences are data about user activity when they visiting a particular Internet-resource. These data are collected mainly implicitly (logging user actions) and have the following main properties: significant volume and rapid change (or update) of data over time.

Common problems that are inherent in all the recommender systems are: first, the so-called "cold start" problem; secondly, the frequent banality, the routine of recommendations, which reduces users' confidence in the advisability of following them.

Systems, that are capable of issuing relevant recommendations shorten the time required to search a various objects and services, and significantly increase the likelihood of entering into the field of view of the user other objects that can interest him. And as a result, they increase loyalty and satisfaction of users with Web-services. This, in turn, leads to increased consumption and profit growth. Therefore, the development of new methods and algorithms to increase the effectiveness of such systems are very relevant.

**Materials and methods.** In this work, is proposed an approach to determine the preferences of users based on the analysis of their behavioral profile. This approach is based on the developed model of choice. Considered the method of structural and parametric identification of this model, based on the ideas of the theory of comparative identification. The main difficulties arising in the course of solving this problem are analyzed. It is shown that the solution of this problem is related to the definition of a model of optimal complexity in the class of the Kolmogorov-Gabors poly-nomial. To find the parameters of the model of choice, it is proposed to use a method based on calculating the Chebyshev point.

**Results.** The analysis of the main approaches to the implementation of the recommender systems is made. The main problems that arise when the relevant recommendations are given to the user are considered. To determine the preferences of the user and to predict his possible estimates for specific brands of goods, is used an approach that based on the use of the comparator identification method. Is given an illustrative example that demonstrates the practical feasibility of the proposed approach.

**Conclusion.** An important advantage of the approach is the possibility of using only implicit methods to obtain information about user preferences. It allows to partially solve the problem of "cold start" inherent in any type of recommender systems. Experimental studies have confirmed the effectiveness of the proposed approach.

The application of this approach will increase the effectiveness of the developed hybrid recommender systems.

Further research should be aimed at developing methods for segmenting users based on the multifactor estimates of objects obtained and any other additional information about them.

---

O.O. Bezsonov

### SPORTS TRAINING SCHEDULING USING GENETIC ALGORITHMS

**Background:** Many practical and theoretical optimization problems are characterized by multidimensional search space. These problems include NP-complete problems of combinatorial optimization, identification of complex structures or multidimensional optimization of functions, etc. Most often, such problems arise in the planning area. The use of traditional methods such as gradient, dynamic programming, a simplex method for solving this problem often does not give the desired result, since the computational costs grow exponentially together with the dimension of the problem. In this connection, heuristic methods with much lower computational costs are often used to solve practical problems, despite the fact that they may not ensure the achievement of a global optimal solution.

**Materials and methods:** In this paper, the focus is on such a section of evolutionary computations as genetic algorithms (GA) that help plan tennis training between players of different sex, age, and experience.

**Results:** A web application was developed to build a training schedule for a group of tennis players of different sex, age, and level of play. When constructing the schedule, the main limitation is the time in which the tennis player can take part in training.

The developed web application consists of two parts:

- Frontend (user interface), using HTML 5, CSS, Javascript, Ajax);
- Backend (genetic algorithm and application logic) using Java 8 technology, Struts-2 framework, Servlets.

To store user data (information about coaches and tennis players), additional service information, and also about the trainings themselves, the mysql-5.7 server was used. The application was hosted on the local Apache Tomcat-8 Web Server.



**Conclusion:** The problem of scheduling sports training with the help of genetic algorithms is considered. The main advantage of GA is that many parameters of the solved problem can be encoded in the genome and determined in parallel.

The result of solving a practical problem is the complete automation of the process of building a training schedule for a group of tennis players. The results of the received web application confirm the high efficiency and speed of the GA.

---

V.M. Levykin, O.V. Chala

**SUPPORTING FOR MANAGING THE COMPOSITE OBJECT  
IN THE MIS USING TEMPORAL DEPENDENCIES**

**Background:** The problem of supporting the management of composite objects under conditions of uncertainty associated with the lack of complete information about the state of such objects is considered. Incompleteness of information arises as a result of exposure to uncontrolled external disturbances, as well as the inability to track a number of parameters of the control object. It is shown that in this case, in order to support management, it is advisable to use temporal dependencies obtained as a result of analyzing the sequence of states of the control object.

These temporal dependencies will allow us to single out both the conditions for the execution of control actions and the set of admissible sequences of actions in the current situation. They reflect the informal personal knowledge of the performers, used in the management of uncontrolled external influences. The combination of these dependencies constitutes a temporal knowledge base and can be used to support the management of a compound object by forming a set of alternative control actions in atypical, abnormal situations.

**Materials and methods:** decision support methods in management information systems.

**Results:** The principles of supporting enterprise management as a composite object under conditions of uncertainty based on temporal knowledge are proposed. A temporal model of a compound object has been developed to support management in the face of uncertainty. A method is proposed for supporting the cycle of controlling a compound object in information and control systems under conditions of uncertainty using temporal dependencies.

**Conclusion:** A knowledge-based approach is proposed that combines the principles, model and method to support the management of an enterprise as a composite object under uncertainty.

The developed temporal model of the compound object includes dependencies between the states of the control object, represented as a set of variables characterizing the control actions and the context of their execution in these states. The model allows you to create control actions based on probabilistic temporal knowledge, reflecting the existing informal experience of achieving the target state of the control object in the enterprise.

The proposed method of supporting the cycle of managing a composite object in management information systems under conditions of uncertainty based on temporal knowledge combines the traditional cycle of building and using a model of an integrated management object using the temporal knowledge base.

The latter is used to assess the current state of the object and support management by forming the most likely sequences of management actions relative to the current state of the management object.

---

A.Y. Doroshenko

**DEVELOPMENT OF DATA MINING INFORMATION TECHNOLOGY  
OF FACTUAL INFORMATION.**

**Background:** For the moment, the fact finding system is one of the most effective tools for identifying information for decision making. The factual information is based on facts. The reliability of auto-seized facts is a major problem in processing factual information.

**Materials and methods:** are based on the use of the theory of intelligence and the method of comparator identification, which are integrated in the creation of information-logical models of intellectual processing of factual text information. The mathematical apparatus of logical algebra, category theory, the theory of relations, methods of classification and clusterization, methods of integration and information search on the basis of ontologies are used.

**Results:** The present work on the technology of intelligent data processing and the sample for application in our subject domain of the universal mathematical apparatus based on the algebra of final predicates were considered in the paper.

**Conclusion:** The approach to extracting factual data from text sources based on the use of ontological specifications is formed. The complex information technology of the intellectual analysis of factual information is developed.

## ОБ АВТОРАХ

<b>Безсонов Александр Александрович</b>	79, 102	доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних систем, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця
<b>Беспалов Юрій Гаврилович</b>	31	старший науковий співробітник науково-дослідної частини, Харківський національний університет ім. В.М. Каразіна
<b>Божко Іван Костянтинович</b>	18	аспірант кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Вірич Світлана Олександрівна</b>	62	кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри гірничих машин і мехатронних систем машинобудування ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
<b>Вишняк Михайло Юрійович</b>	24	кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри системотехніки, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Висоцька Олена Володимирівна</b>	31	доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Гриньова Олена Євгенівна</b>	91	викладач кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Дорошенко Анастасія Юріївна</b>	116	аспірантка кафедри інтелектуальних комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
<b>Затхей Володимир Анатолійович</b>	42	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформатики та комп'ютерної техніки, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця
<b>Іванова Єлизавета Сергіївна</b>	31	студентка кафедри біомедичної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Калиниченко Валерій Вікторович</b>	62	кандидат технічних наук, завідувач кафедри інженерної механіки Індустріального інституту, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
<b>Кісляя Алла Геннадіївна</b>	91	магістрантка кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Климова Ірина Миколаївна</b>	24	асистент кафедри системотехніки, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Кобзев Ігор Володимирович</b>	97	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та систем управління ХарРІ НАДУ при Президенті України
<b>Коваль Сергій Андрійович</b>	70	аспірант кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет водного господарства та природокористування
<b>Колісник Ярослав Вікторович</b>	18	аспірант кафедри медіасистем і технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Кузнецов Олексій Володимирович</b>	84	магістрант кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Левикін Віктор Макарович</b>	110	доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Мазурова Оксана Олексіївна</b>	37	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Магріна Анна Володимирівна</b>	37	магістрантка кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки

<b>Носов Константин Валентинович</b>	31	кандидат фізико-математичних наук, доцент, науковий співробітник лабораторії моделювання адаптаційних механізмів, Харківський національний університет ім. В.М. Каразіна
<b>Петров Костянтин Едуардович</b>	97	доктор технічних наук, професор, професор кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Подкопаєв Сергій Вікторович</b>	62	доктор технічних наук, професор, декан гірничого факультету, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
<b>Повзун Олексій Іванович</b>	62	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки, Індустріальний інститут ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
<b>Рибчак Зоряна Любомирівна</b>	48	асистент кафедри ІСМ, Національний університет «Львівська Політехніка»
<b>Романюк Олександр Сергійович</b>	79	аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Руденко Олег Григорійович</b>	79	доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця
<b>Сафоник Андрій Петрович</b>	70	доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет водного господарства та природокористування
<b>Сидоров Максим Вікторович</b>	53	кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри прикладної математики, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Страшненко Анна Николаевна</b>	31	кандидат технічних наук, науковий співробітник кафедри біомедичної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Таргоній Іван Миколайович</b>	70	аспірант кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет водного господарства та природокористування
<b>Тесленко Олег Володимирович</b>	42	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформатики та комп'ютерної техніки, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця
<b>Удовенко Сергій Григорович</b>	42, 84	доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Чала Лариса Ернестівна</b>	84, 91	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Чала Оксана Вікторівна</b>	110	кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки
<b>Четвериков Григорій Григорович</b>	18	доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмної інженерії, 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>	37	старший викладач кафедри програмної інженерії, 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, заголовки, анотації (на трьох мовах), ключові слова, вступ, основний текст статті, висновки, список використаної літератури, резюме.

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 у 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 12 сторінок (мови: українська, англійська, російська та мовою оригіналу).

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.

*Анотації* (мовою статті, абзац 6–12 рядків, кегль 9) розміщують на початку статті, в ній має бути розміщена інформація про очікувані результати описаних досліджень (на трьох мовах).

*Ключові слова* (4–10 слів з тексту статті, які з точки зору інформаційного пошуку несуть змістовне навантаження) наводять мовою рукопису, через кому в називному відмінку, кегль 9.

*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, укладені у квадратні дужки, друкують без абзацного відступу, кегль 9 пт, відступ зверху – 6 пт.

Після списку літератури з відступом зверху 6 пт зазначають *дату подання статті до редколегії*. Число та місяць задають двозначними числами через крапку. Розмір шрифта – 9 пт, курсив, вирівнювання по правому краю.

*Резюме* (Times New Roman, кегль – 10 пунктів,) подають англійською мовою: обсяг резюме до 2000 знаків (бажаний переклад). *Структура резюме: Background, Materials and methods, Results, Conclusion.*

Разом із рукописом (на аркушах білого паперу формату А4 щільністю 80-90 г/м<sup>2</sup>, надрукований на лазерному принтері) необхідно подати такі документи:

1. Заяву, яку повинні підписати всі автори.
2. Акт експертизи про можливість опублікування матеріалів у відкритому друці (якщо потрібно).
3. Рецензію, підписану доктором чи кандидатом наук.
4. Відомості про авторів.
5. Електронний варіант рукопису, резюме та відомостей про авторів.
6. Зробити оплату публікації.

Необхідно також зазначити 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.

## Приклад оформлення статті

УДК 519.62

Г.Г. Четвериков<sup>1</sup>, І.Д. Вечірська<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ХНУРЕ, м. Харків, Україна, grigorij.chetverykov@nure.ua;

<sup>2</sup> ХНУРЕ, м. Харків, Україна, ira\_se@list.ru

### 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 аналіз 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  $T$ .

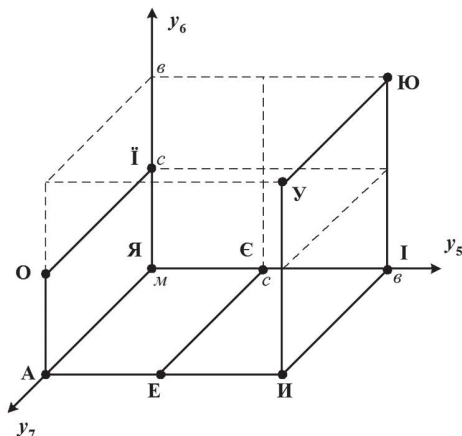


Рис. 1. Тривимірний простір ознак для голосних фонем

#### 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.

Надійшла до редколегії 15.02.2007

#### Resume

G.G. Chetverikov, I.D. Vechirskaaya  
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 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 a 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.

---

Видавництво здійснює остаточне форматування тексту відповідно вимогам друку.

**Адреса редакції:** Україна, 61166, м. Харків, просп. Науки 14, ХНУРЕ, к.127, тел. 702-14-77, факс 702-10-13, e-mail: bionics19@gmail.com.

## СОДЕРЖАНИЕ

**СТРУКТУРНАЯ, ПРИКЛАДНАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ЛИНГВИСТИКА. ТЕОРИЯ ИНТЕЛЛЕКТА**

<i>Широков В.А.</i> Эволюция как универсальный естественный закон (пролегомены к будущей общей теории эволюции). Часть третья.....	3
<i>Bozhko I., Chetverykov G., Kolisnyk Ya.</i> The Q# programming language investigation .....	18
<i>Vyshniak M., Klytova I.</i> The basic issues of knowledge management bionics.....	24

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

<i>Носов К.В., Беспалов Ю.Г., Высоцкая Е.В., Страшненко А.Н., Иванова Е.С.</i> Моделирование колориметрических параметров микрокосмов для улучшения режимов эксплуатации тестовых микроэкосистем .....	31
<i>Маргіна А.В., Мазурова О.О., Широкопетлева М.С.</i> Розробка математичної моделі задачі планування витрат для системи керування власним бюджетом.....	37
<i>Удовенко С.Г., Затхей В.А., Тесленко О.В.</i> Моделювання МІМОсистеми передачі даних в інфокомунікаційних мережах .....	42
<i>Рибчак З.Л.</i> Методи та засоби моделювання плану першочерговості ремонту доріг в межах територіальної громади .....	48
<i>Сидоров М.В.</i> Метод двобічних ітерацій у чисельному аналізі першої крайової задачі для системи напівлінійних еліптичних рівнянь.....	53
<i>Повзун Олексій, Подкопасєв Сергій, Калиниченко Валерій, Вірич Світлана.</i> Математичне моделювання системи «дьюготь — полімер — наповнювач» за допомогою системи комп'ютерної алгебри Maple .....	62
<i>Сафоник А.П., Таргоній І.М., Коваль С.А.</i> Моделювання та автоматизація процесу електрокоагуляційного очищення стічних вод .....	70

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ. НЕЙРОННЫЕ СЕТИ. НЕЙРОМАТЕМАТИКА**

<i>Руденко О.Г., Безсонов О.О., Романюк О. С.</i> Про один алгоритм навчання нейронної мережі в задачі прогнозування часових рядів .....	79
<i>Кузнецов О.В., Чала Л.Е., Удовенко С.Г.</i> Нейромережевий метод кешування даних.....	84
<i>Кісля А. Г., Чала Л.Е., Гриньова О.Є.</i> Нейромережева модель виявлення ботів в соціальних мережах.....	91

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ**

<i>Петров К.Э., Кобзев И.В.</i> Прогнозирование предпочтений пользователей на основе анализа их действий.....	97
<i>Бессонов А.А.</i> Составление расписания спортивных тренировок с помощью генетических алгоритмов.....	102
<i>Левикін В.М., Чала О.В.</i> Підтримка управління складним об'єктом в ІУС з використанням темпоральних залежностей .....	110
<i>Дорошенко А.Ю.</i> Розробка інформаційної технології інтелектуального аналізу фактографічної інформації.....	116
Resume .....	122
Об авторах .....	130
Правила оформлення рукописів для авторів науково-технічного журналу «Біоніка інтелекту».....	132

*Наукове видання*

**БІОНІКА ІНТЕЛЕКТУ**  
**інформація, мова, інтелект**

**Науково-технічний журнал**

**№ 1 (90)**

**2018**

Головний редактор — *Г. Г. Четвериков*  
Відповідальний редактор — *І. Д. Вечірська*

Комп'ютерна верстка — *О. Б. Ісаєва*

Рекомендовано Вченою Радою  
Харківського національного університету радіоелектроніки  
(протокол № 8 від 03.07.2018 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: bionics19@gmail.com

---

Підписано до друку 03.07.2018. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Друк ризографічний.  
Папір офсетний. Гарнітура Newton. Умов. друк. арк. 15,1. Обл.-вид. арк. 15,0.  
Тираж 100 прим.

Віддруковано в редакційно-видавничому відділі ХНУРЕ  
61166, Харків, просп. Науки, 14.