ISSN 2079-0023 (Print)
ISSN 2410-2857 (Online)

ВІСНИК

**Національного технічного університету «ХПІ».
Серія: Системний аналіз, управління
та інформаційні технології**

ВЕСТНИК

**Национального технического университета «ХПИ».
Серия: Системный анализ, управление
и информационные технологии**

BULLETIN

**of the National Technical University "KhPI".
Series: System analysis, control
and information technology**

№ 1 (3) 2020

Харків

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології

Збірник наукових праць
№ 1 (3) 2020
Видання засноване у 1961 р.

Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Системный анализ, управление и информационные технологии

Сборник научных работ
№ 1 (3) 2020
Издание основано в 1961 г.

Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology

Collection of Scientific papers
No. 1 (3) 2020
The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2020

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології = Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Системный анализ, управление и информационные технологии = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2020. — № 1 (3) 2020. — 132 с. — ISSN 2079-0023.

Видання публікує нові наукові результати в області системного аналізу та управління складними системами, отримані на основі сучасних прикладних математичних методів і прогресивних інформаційних технологій. Публікуються роботи, пов'язані зі штучним інтелектом, аналізом великих даних, сучасними методами високопродуктивних обчислень у системах підтримки прийняття рішень.

Издание публикует новые научные результаты в области системного анализа и управления сложными системами, полученные на основе современных прикладных математических методов и прогрессивных информационных технологий. Публикуются работы, связанные с искусственным интеллектом, анализом больших данных, современными методами высокопродуктивных вычислений в системах поддержки принятия решений.

Для научных работников, преподавателей высшей школы, аспирантов, студентов и специалистов в области системного анализа, управления и компьютерных технологий.

Edition publishes new scientific results in the field of system analysis and control of complex systems, based on the application of modern mathematical methods and advanced information technology. Works related to artificial intelligence, big data analysis and modern methods of high-performance computing in decision support systems are publishing.

For scientists, teachers of higher education, post-graduate students, students and specialists in the field of systems analysis, management and computer technology.

Свідоцтво Міністерства юстиції України
КВ № 23778-13618Р від 14 лютого 2019 р.

Мова статей – українська, російська, англійська.

Наказом МОН України № 1643 від 28 грудня 2019 року «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 18 грудня 2019 року» «Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології» внесено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук».

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в базу журналів відкритого доступу DOAJ (Directory of Open Access Journals), бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: http://samit.khpi.edu.ua/

Засновник
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Редакційна колегія
Головний редактор:
Годлевський М. Д., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Заступник головного редактора
Куценко О. С., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Члени редколегії:
Александрова Т. Є., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Безменов М. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Бентаєб Ф., доц., Ліонський університет-2, Франція
Богомолов С., доц., Австралійський національний університет, Австралія
Гамаюн І. П., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Дідманідзе І., проф., Батумський держ. ун-т ім. Шота Руставелі, Грузія
Дорофєєв Ю. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Керстен В., проф., Гамбурзький технологічний університет, Німеччина
Любчик Л. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Павлов О. А., проф., НТУУ «КПІ», Україна
Раскін Л. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Северин В. П., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Ткачук М. В., проф., ХНУ ім. В. Н. Каразіна, Україна
Хайрова Н. Ф., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Шаронова Н. В., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Відповідальний секретар
Безменов М. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Editorial
Editor-in-chief
Godlevskyi M. D., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Deputy editor-in-chief
Kutsenko O. S., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Editorial staff members:
Alexandrova T. E., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Bezmenov M. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Bentayeb F., Associate Professor,University of Lyon-2, France
Bogomolov S., Assistant Professor, Australian National University, Australia
Gamayun I. P., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Didmanidze I., prof., Batumi Shota Rustaveli State University, Georgia
Dorofieiev Yu. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Kersten Wolfgang, Prof., Hamburg University of Technology, Germany
Lyubchyk L. M., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Pavlov O. A., prof., NTUU "KPI", Ukraine
Raskin L. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Severin V. P., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Tkachuk M. V., prof., V. N. Karazin KhNU, Ukraine
Khairova N. F., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Sharonova N. V., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Executive secretary:
Bezmenov M. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 4 від 3 липня 2020 р.

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2020

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕОРИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY

УДК 004.4:519.2 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.01**

Л. С. СМІДОВИЧ

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПОСЛУГ VOIP

Метою дослідження є автоматизація виявлення ознак технічних несправностей та погіршення якості послуг в мережі віртуального оператора VoIP. Погіршення якості призводить до зменшення обсягу наданих послуг, а відповідно прибутку, до зменшення лояльності абонентів та втрати частки ринку. Виділено три рівня погіршення якості в мережах VoIP: відсутність доступу на рівні мережі передачі даних (МПД), неможливість встановлення голосового з'єднання, тобто відсутність доступу на рівні прикладних сервісів, та погіршення якості сервісу. Проведено аналіз абсолютних та відносних статистичних показників якості IP-телефонії у відповідності до вимог міжнародних стандартів ITU-T, перелічені головні показники та наведено формули для їх розрахунку. Значення статистичних показників якості періодично розраховуються для зовнішніх каналів, груп абонентів та тарифних напрямків. Первинними даними виступають записи CDR (call data records). Для виявлення аномальних змін значень показників якості запропоновано використати методу експоненційного згладжування – адитивну модель Холта-Вінтерса. Розраховується відхилення поточного значення показників якості від прогнозованого. Діапазон довіри розраховується по метод Брутлага. Якщо відхилення виходить за межі діапазону довіри, зміна значення показника вважається аномальною, та встановлюється значення коефіцієнту аномалії даного показника. Період характеризується вектором коефіцієнтів аномалії всіх показників якості. Для класифікації періоду як аномального використовується значення модулю вектору коефіцієнтів аномалії у даному періоду. Також розглянуто особливості застосування методу, зокрема вибір періоду сезону та розрахунок коефіцієнтів аномалії в періоди мінімального навантаження. Метод, який запропоновано, дозволяє діагностувати аномальну зміну значень показників якості послуг VoIP в автоматизованому режимі. На його основі розроблено прототип автоматизованої системи моніторингу якості послуг VoIP.

Ключові слова: послуги VoIP, статистична обробка трафіку, CDR, метрики якості послуг, ASR, ACD, аномалії трафіку, експоненційне згладжування, алгоритм Холта-Вінтерса.

Л. С. СМИДОВИЧ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА УСЛУГ VOIP

Целью исследования является автоматизация обнаружения признаков технических неисправностей и ухудшения качества услуг в сети виртуального оператора VoIP. Ухудшение качества приводит к уменьшению объема предоставляемых услуг, а соответственно прибыли, к уменьшению лояльности абонентов и потери доли на рынке. Выделены три уровня ухудшение качества в сетях VoIP: отсутствие доступа на уровне сети передачи данных (СПД), невозможность установления голосового соединения, то есть отсутствие доступа на уровне прикладных сервисов, и ухудшение качества сервиса. Проведен анализ абсолютных и относительных статистических показателей качества IP-телефонии в соответствии с требованиями международных стандартов ITU-T, перечислены основные метрики и приведены формулы для их расчета. Значение статистических показателей качества периодически рассчитываются для внешних каналов, групп абонентов и тарифных направлений. Первичными данными выступают записи CDR (call data records). Для выявления аномальных изменений значений показателей качества предложено использовать метода экспоненциального сглаживания – аддитивную модель Холта-Винтерса. Рассчитывается отклонение текущего значения показателей качества от прогнозируемого. Диапазон доверия рассчитывается по метод Брутлага. Если отклонение выходит за пределы диапазона доверия, изменение значения показателя считается аномальным, и устанавливается значение коэффициента аномалии этого показателя. Период характеризуется вектором коэффициентов аномалии всех показателей качества. Для классификации периода как аномального используется значение модуля вектора коэффициентов аномалии. Также рассмотрены особенности применения метода, в частности выбор периода сезона и расчет коэффициентов аномалии в периоды минимальной нагрузки. Предложенный метод позволяет диагностировать аномальное изменение значений показателей качества услуг VoIP в автоматизированном режиме. На его основе разработаны прототип автоматизированной системы мониторинга качества услуг VoIP.

Ключевые слова: услуги VoIP, статистическая обработка трафика, CDR, метрики качества услуг, ASR, ACD, аномалии трафика, экспоненциальное сглаживание, алгоритм Холта-Винтерса.

L. S. SMIDOVYCH

USE OF THE STATISTICAL ANALYSIS METHODS TO DETECT VOIP NETWORK TRAFFIC ANOMALIES

The purpose of the study is to automate detection of signs of technical malfunction and deterioration in the quality of services in the VoIP network. Deterioration of quality leads to a decrease in the volume of services provided, and consequently a profit, a decrease in customer loyalty and loss of market share. There are three levels of quality degradation in VoIP networks: lack of access at the data network layer, inability to establish a voice

© Л. С. Смідович, 2020

connection and lack of access at the level of application services, and degradation of service quality. The analysis of absolute and relative statistical quality indicators of IP-telephony in accordance with the requirements of the international ITU-T standards has been performed, and main indicators and formulas for their calculation are listed. The values of statistical quality indicators are periodically calculated for external channels, subscriber groups and tariff directions. The primary data is CDR (call data records). To detect anomalous changes in the values of the quality indicators it is proposed to use the exponential smoothing method – the Holt-Winters additive model. The deviation of the current value of the quality indicators from the forecasted one is calculated. The confidence range is calculated using the Brutlag method. If the deviation goes beyond the confidence range, the change in the value of the indicator is considered anomalous and the value of the anomaly coefficient of the indicator is set. The period is characterized by a vector of anomaly coefficients of all quality indicators. To classify the period as anomalous, the value of the module of the anomaly coefficients vector of the given period is used. The features of the method application are also considered, in particular the choice of the seasonal period and the calculation of anomaly coefficients during periods of minimum load. The proposed method allows to diagnose an abnormal change in the values of VoIP service quality indicators in automated mode. The prototype of an automated system for the quality of VoIP service monitoring was developed on the base of the method described.

Keywords: VoIP services, statistical traffic processing, CDR, service quality metrics, ASR, ACD, traffic anomalies, exponential smoothing, Holt-Winters algorithm.

Вступ. Метою дослідження є виявлення ознак технічних несправностей та погіршення якості послуг в мережі віртуального оператора IP-телефонії. IP-телефонія (VoIP) – це передача голосового трафіку по мережах передачі даних (МПД). Зараз послуги VoIP найчастіше надаються із використання сигнального протоколу SIP [1]. Послуги IP-телефонії можуть надавати як традиційні оператори зв'язку, так і віртуальні (OTT – Over-The-Top) оператори.

Важливою задачею оператора VoIP є забезпечення якості послуг [2]. Погіршення якості в короткостроковій перспективі призводить до зменшення обсягу наданих послуг, а відповідно і прибутку, а в довгостроковій – до зменшення лояльності абонентів та втрати оператором частки ринку. Важливим є своєчасне встановлення факту погіршення якості та діагностика, що вирішується застосуванням інформаційних систем моніторингу якості.

Особливістю віртуального оператора є те, що він не має власної мережі доступу, абоненти і оператори-партнери підключаються через загальнодоступні мережі (Інтернет). Основою технічної інфраструктури віртуального оператора VoIP є один або кілька комутаторів – софтсвічей. Софтсвіч (Softswitch) – це програмний комутатор, який управляє обслуговуванням викликів і координує обмін сигнальними повідомленнями між мережами абонентів і операторів-партнерів. У віртуального оператора, як правило, відсутня можливість наскрізного моніторингу технічних характеристик каналів зв'язку і їх прямого тестування, тому актуальним завданням є розробка альтернативних методів моніторингу якості послуг.

Аналіз об’єкту дослідження та публікації. Можна виділити кілька рівнів погіршення якості в мережах VoIP:

- відсутність доступу на рівні МПД (мережі передачі даних);
- неможливість встановлення голосового з'єднання;
- погіршення якості сервісу.

Причинами відсутності доступу абонентів до мережі провайдера VoIP, або доступу провайдеру до мереж партнерів, і як наслідок – неможливості встановити з'єднання, є несправності на рівні транспортної мережі. В цьому випадку відсутні записи про успішні або неуспішні виклики для окремого абонента, оскільки виклик не поступає на софтсвіч; або спроби встановити з’єднання з обладнанням партнера завершуються помилками певного виду.

Неможливість встановлення голосового з’єднання (виклику) може бути викликана як неузгодженістю на рівні використовуваних протоколів і кодеків, помилками в конфігурації обладнання, помилками при наборі номера, так і природними причинами – наприклад зайнятістю або недоступністю (поза мережею) терміналу абонента. До технічних несправностей другого рівня можна також віднести неможливість встановлення з’єднання за деякими маршрутами: через певного партнера, або за певними тарифними напрямками. Основними їх ознаками є низька частка успішних дзвінків, або їх відсутність, а також специфічні коди завершення SIP-сесії (наприклад, помилки сервера, відсутність маршруту, скидання з’єднання та ін.).

Під погіршенням якості сервісу будемо розуміти ситуацію, коли з’єднання з абонентом встановлюється, але якість передачі голосу не задовольняє абонента.

Для «класичної» проводної телефонії використовуються методи оцінки якості, засновані на вимірі електротехнічних характеристик каналу зв’язку, таких як залишкове загасання, АЧХ (амплітудно-частотні характеристики), співвідношення сигнал/шум та ін. Для мереж VoIP в якості технічних характеристик використовують метрики продуктивності мережі передачі даних (МПД): втрати, затримку та її варіацію (джитер, jitter) [3, 4].

Одними з основних показників якості IP-телефонії є якість передачі голосового сигналу, а так само якість встановлення виклику. Технічні метрики не завжди є інформативними з точки зору оцінки якості послуги IP-телефонії, оскільки абонент оцінює якість інтегрально, тому використаються так звані суб’єктивні або інтегральні оцінки [4, 5]. Одним з інтегральних показників є MOS (Mean Opinion Score – суб’єктивна оцінка якості) [стандарт ITU-T P.800] або PSQM [стандарт ITU-T P.861]. Існують методики розрахунку MOS на підставі значень метрик продуктивності СПД, наприклад алгоритми PESQ. Інший часто використовуваний інтегральний показник якості – R-фактор (Overall transmission quality rating) [5]. Для вимірювання і моніторингу вищезазначених показників якості потрібне використання комутаторів с відповідним функціоналом, або додаткового вимірювального обладнання та/або програмного забезпечення.

Альтернативним підходом до вимірювання якості послуг VoIP є використання статистичних метрик трафіку, які, зокрема, визначені в рекомендаціях ITU-T E.437 [6] та ITU-T E.411 [7]. Саме такий підхід будемо використовувати для виявлення ознак технічних несправностей та погіршення якості послуг VoIP.

Для моніторингу стану складних комунікаційних систем, зокрема IP мереж передачі даних [8, 9], технічних систем та транспортних мереж [10], успішно використаються методи аналізу динаміки часових рядів.

Метрики якості послуг VoIP. Абсолютними метриками є кількість успішних з'єднань та сумарна тривалість викликів за одиницю часу. Вони дозволяють оцінити навантаження на мережу та її пропускну спроможність. З іншого боку, ці показники залежать від активності абонентів в той чи інший період часу, тому в явному вигляді не можуть використатися як метрики якості послуг. О погіршенні якості може свідчити їх аномальна зміна.

Рекомендація ITU-T E.437 [6] визначає відносні метрики якості, які перелічені нижче.

Answer Seizure Ratio (ASR) – частка успішних дзвінків:

$$ASR = \frac{N_{\mathrm{a}}}{N_{\mathrm{c}}}, \qquad (1)$$

де N_{a} – кількість успішних з'єднань;

N_{c} – сумарна кількість викликів.

Post gateway answer delay (PGAD) – це затримка між надходженням виклику на комутатор і відповіддю абонента (або завершенням з'єднання в разі неуспішного дзвінка). Вона дозволяє оцінити (порівняти) якість встановлення з'єднання на різних зовнішніх каналах. Ця метрика зазвичай присутня в даних CDR.

Average length of conversation (ALOC) або Average Call Duration (ACD) – середня тривалість дзвінків. Вона може відрізнятися для різних абонентських сценаріїв, але її зменшення може свідчити про погіршення якості передачі голосу.

$$ACD = \frac{\sum_{i=1}^{N} T_i}{N_{\mathrm{a}}}, \qquad (2)$$

де N_{a} – кількість успішних з'єднань;

T_i – тривалість кожного з'єднання.

Рекомендація ITU-T E.411 [7] вводить метрику Network Efficiency Ratio (NER), яка дозволяє оцінити якість каналу без урахування впливу поведінки абонентів – успішними вважаються виклики, які досягли абонента, навіть якщо він не відповів, чи скинув дзвінок, або номер зайнятий. Причина завершення виклику встановлюється відповідно коду завершення SIP діалогу [11].

$$NER = \frac{N_{\mathrm{a}} + N_{\mathrm{na}} + N_{\mathrm{b}} + N_{\mathrm{r}}}{N_{\mathrm{c}}}, \qquad (3)$$

де N_{a} – кількість успішних з'єднань;

N_{na} – кількість викликів, коли абонент не відповів (коди SIP 406, 408);

N_{b} – кількість викликів, коли номер зайнятий (код SIP 486);

N_{r} – кількість викликів, коли абонент відмінив виклик (код SIP 487);

N_{c} – сумарна кількість викликів.

Додатково можуть розраховуватись і значення інших показників, наприклад доля викликів, які завершилися із помилками маршрутизації або іншими помилками на боці оператора-партнера, середня тривалість встановлення з'єднання (PDD, Post Dial Delay) та ін.

Значення показників якості динамічно змінюються з часом та утворюють часовий ряд. Суттєві відхилення значень метрик якості, або зміна в поведінці часових рядів може бути ознакою зміни якості сервісу VoIP. Таким чином, для моніторингу якості послуг VoIP може виконуватись пошук аномалій в значеннях відповідних показників.

Завданням дослідження є розробка методу та інструментів автоматичного виявлення погіршення якості послуг VoIP [12]**.** Автоматизація моніторингу потребує вирішення таких задач:

- збір та накопичення даних трафіку VoIP;
- розрахунок базових статистичних показників, які є абсолютними та відносними метриками якості;
- аналіз динаміки зміни значень метрик якості та виявлення їх аномалій, які можуть служити ознакою погіршення якості сервісу;
- прийняття рішення про класифікацію періоду як аномального за сукупністю значень.

Збір вхідних даних. Вхідними даними для аналізу є записи CDR (call data records) про успішні і не успішних виклики, що надходять з комунікаційного обладнання і містять інформацію про дату і час виклику, номер або SIP-адресу абонентів, тривалості встановлення з'єднання і самого з'єднання, коди завершення протоколу SIP, ідентифікатори зовнішніх каналів (транків), по яким було відправлено виклик тощо. В залежності від типу використовуваного комунікаційного обладнання, CDR може містити і інші дані, наприклад значення метрик якості каналу, таких як втрати, затримка і її варіація – джитер, або навіть інтегральну оцінку якості MOS.

Після завершення кожного виклику софтсвіч дописує відповідну запис в файл. Ці файли періодично обробляються програмним забезпеченням системи моніторингу та окремі записи зберігаються в базі даних.

Первинний статистичний аналіз даних CDR полягає в розрахунку значень показників трафіку, які можуть служити метриками для оцінки та порівняння якості послуги, що надається абонентам, або якості зовнішніх каналів. Дані показники розраховуються періодично, за рівні періоди часу.

Важливим питанням є вибір періоду агрегації, тобто періоду часу, за який розраховується значення показників якості. З одного боку, для оперативного виявлення погіршення якості показники мають

перераховуватись досить швидко (наприклад, кожні 5–10 хвилин). З іншого боку, запис CDR формується після закінчення дзвінка. У періоди низького навантаження вплив довгих (тривалість яких перевищує період розрахунку, тобто більше 15-20 хвилин) дзвінків на значення метрик якості може бути надто високим, що призводить до значних коливань їх значень, і відповідно до збільшення кількості помилкових позитивних результатів. Тому період агрегації має перевищувати типову тривалість довгих дзвінків.

Пропонується встановити інтервал розрахунку значення показників якості рівним 5 або 10 хвилин, при цьому період агрегації встановити на рівні 1 години. Розрахунок виконується в розрізі абонентів (груп абонентів), зовнішніх каналів і тарифних напрямків.

Таким чином, кожний розрахунковий інтервал t характеризується вектором поточних значень показників якості.

$$\boldsymbol{Q}_t = < q_t^1, q_t^2, \dots, q_t^N >, \tag{4}$$

де q_t^i – значення i-го показника у інтервалі t.

Розраховані значення зберігаються в базі даних, є можливість їх графічного відображення – приклад наведено на рис. 1.

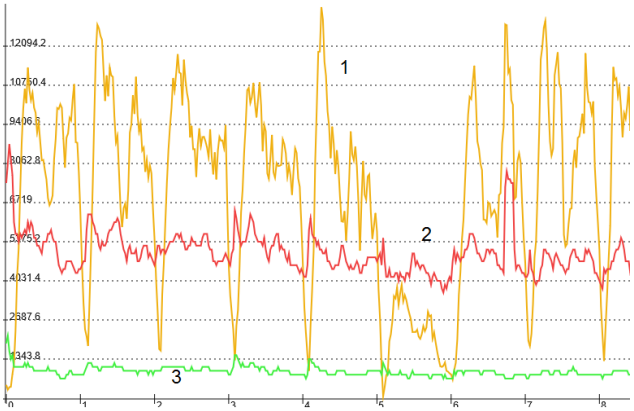


Рис. 1. Графіки (1) сумарної тривалості викликів, (2) ASR та (3) середньої тривалості встановлення з'єднання

На рис. 1 зображені графіки наступних показників: сумарної тривалості викликів, ASR та середньої тривалості встановлення з'єднання. Можна помітити, що суттєва зміна значення абсолютного показника – сумарної тривалості викликів – не призводить до помітної зміни значень відносного показника – ASR. У даному випадку зниження обсягу трафіку пов'язано із зниженням активності абонентів, а не із погіршенням якості послуг.

Статистичний аналіз динаміки показників якості дозволяє виявляти зміни в характеристиках трафіку або характеристиках зовнішніх каналів, які можуть служити ознаками зміни (погіршення) якості послуг.

Очевидним способом виявлення аномалій є контроль виходу значень показників за заздалегідь визначені мінімальні та/або максимальні ліміти. Наприклад, зазвичай в міжоператорських договорах встановлюються граничні значення таких метрик якості, як ASR. Але, оскільки значення показників якості залежать, зокрема, від активності абонентів, такий підхід веде до значної кількості помилкових позитивних результатів і не може вважатися достовірним.

Альтернативою є застосування методів диференціального аналізу, який полягає у виявленні змін в поведінці часових рядів. Для цього пропонується використання методів експоненційного згладжування часового ряду, зокрема методу Хольта–Вінтерса. Особливістю цього методу є то, що він дозволяє врахувати сезону компоненту часового ряду.

Застосування адитивної моделі Хольта–Вінтерса для виявлення аномалій в динаміці показників якості послуг VoIP полягає в розрахунку відхилення поточного значення показника від розрахункового, останнє обчислюється як прогноз по попереднім значенням часового ряду, який відповідає показнику якості.

$$\delta_{t+1} = |\tilde{Y}_{t+1} - Y_{t+1}|, \tag{5}$$

$$\tilde{Y}_{t+1} = a_{t+1} + b_{t+1} + c_{t-T+1}, \tag{6}$$

$$a_{t+1} = \alpha(Y_t - c_{t-T}) + (1-\alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}), \tag{7}$$

$$b_{t+1} = \beta(a_t - a_{t-1}) + (1-\beta)b_{t-1}, \tag{8}$$

$$c_{t+1} = \gamma(Y_t - a_t) + (1-\gamma)c_{t-T}, \tag{9}$$

де δ – відхилення значення показника;
$\tilde{Y}_{t+1}$ – розрахункове значення показника;
a_{t+1} – значення базової компоненти;
b_{t+1} – значення тренду;
c_{t+1} – значення сезонної компоненти;
T – період сезону;
α,β,γ – коефіцієнти адаптації.

Зміна значення показника якості вважається аномальною, якщо відхилення його поточного значення від розрахункового виходить за межі діапазону довіри, тобто:

$$\delta_{t+1} > d_{t+1}. \tag{10}$$

Для розрахунку діапазону довіри використається метод Брутлага [13], згідно якому

$$d_{t+1} = \gamma\left(Y_t - \tilde{Y}_t\right) + (1-\gamma)d_{t-T}, \tag{11}$$

де d_{t+1} – прогнозоване значення відхилення.

На рис. 2 наведено приклад графіків поточного (1) та розрахункового (2) значення ASR, та їх відхилення (3). Вертикальні смуги відмічають інтервали, в яких відхилення виходить за межі діапазону довіри.

Якщо було діагностовано аномальну зміну показника, для даного показника встановлюється коефіцієнт аномалії, рівний кількості послідовних інтервалів, протягом яких було визначено його аномалію.

$$a_t^i = \begin{cases} a_{t-1}^i + 1, & \delta_t > d_t, \\ 0, & \delta_t \le d_t, \end{cases} \tag{12}$$

де a_t^i – коефіцієнт аномалії i-го показника у інтервалі часу t.

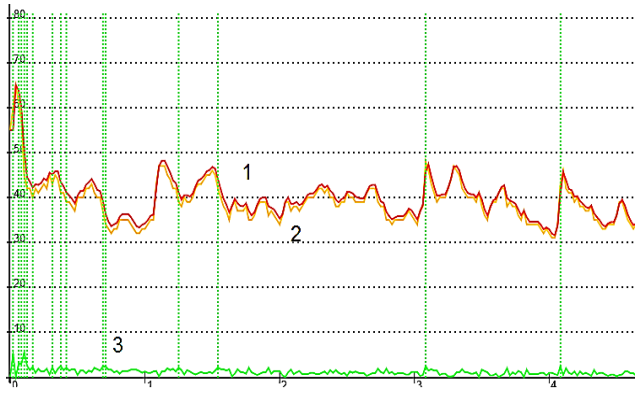


Рис. 2. Графіки поточного та розрахункового значення ASR, та їх відхилення

Таким чином, кожний інтервал часу T характеризується вектором коефіцієнтів аномалії показників якості.

$$\boldsymbol{A}_t = < a_t^1, a_t^2, \dots, a_t^N > . \quad (13)$$

Класифікація періоду як аномального виконується по значенню модуля вектору аномалії.

$$|\boldsymbol{A}_t| = \sum_i a_t^i. \quad (14)$$

Особливості застосування методу для моніторингу якості послуг VoIP.

Трафік VoIP має виражену сезонність. Зазвичай періодом сезону є доба та/або тиждень. Протягом доби трафік збільшується у ГНН (години найбільшого навантаження) і відповідно зменшується у години найменшого навантаження. Тижневі коливання пов'язані, перш за все, з розподілом днів на робочі та вихідні.

Для розрахунку прогнозу та відхилення значення показника (4-9), крім попередніх значень показника, необхідне його значення за минулий сезон. Таким чином, для розрахунків необхідно зберігати T останніх значень показника, де T – період сезону. Якщо інтервал розрахунку дорівнює 10 хвилинам, добовий сезон містить 6*24 = 144 інтервалів, а тижневий – 144*7 = 1008 інтервалів.

Пропонується в якості тривалості сезону встановити добу. Для врахування коливань навантаження та, відповідно, значень показників якості, протягом тижня часовий ряд розбивається на декілька субрядів за класифікаційною ознакою. Це також дозволяє враховувати нерегулярності навантаження, які привносяться, наприклад, святковими днями.

Під час зниженого навантаження мережі значення відносних метрик (ASR, ASD, NER тощо) можуть зазнавати значних коливань, що призводить до збільшення кількості помилкових позитивних результатів. Пропонується наступне. Якщо аномалія відносного показника зафіксована у період низького навантаження, значення коефіцієнту аномалії множиться на коригуючий коефіцієнт, менший одиниці. Обсяг навантаження оцінюється за сумарною кількістю викликів (успішних та не успішних), що виключає вплив можливого погіршення якості на оцінку.

Висновки. Використання розглянутого методу дозволяє в автоматичному режимі діагностувати аномальну зміну значень показників якості послуг IP-телефонії. Така зміна є вірогідною ознакою зміни (погіршення) якості послуг. Застосування методу не потребує попереднього навчання, та значних обчислювальних ресурсів. Для розрахунку достатньо T (кількість інтервалів в сезону) попередніх значень показників якості.

З використанням підходу, який запропоновано, розроблено прототип автоматизованої системи моніторингу якості послуг VoIP, яка дозволяє виявляти як відомі несправності, так і невідомі. Але зміна значень показників якості може свідчити як про погіршенням якості, так і про зміні поведінки користувачів мережі. Тому остаточне прийняття рішення потребує участі спеціалістів технічної підтримки.

Метою наступних досліджень є аналіз методів, за допомогою яких можливо провести класифікацію аномалії, вибір найбільш ефективного методу та його адаптація для автоматичного діагностування несправностей в мережах IP-телефонії.

Список літератури

1. *RFC 3261. SIP: Session Initiation Protocol.* IETF, 2002. URL: https://tools.ietf.org/html/rfc3261 (дата звернення 20.09.2019).
2. Заплотинський Б. А. Поліпшення якості послуг у сфері телекомунікацій на основі впровадження підходів з управління якістю. *Економіка. Менеджмент. Бізнес*. 2015. № 1. С. 30–38.
3. Сахаров А. В. Статистические модели трафика IP-телефонии: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.13.01. Нижний Новгород, Нижегор. гос. техн. ун-т, 2007. 16 с.
4. N. Ghiata, M. Marcu. Measurement methods for QoS in VoIP review. 3rd International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2011, Budapest, Hungary. 2011. P 1–6.
5. *ETSI TS 102 024-2. Definition of Speech Quality of Service (QoS) Classes.* ETSI, 2003. URL: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102000_102099/10202402/04.01.01_60/ts_10202402v040101p.pdf (дата звернення 20.09.2019).
6. *E.437: Comparative metrics for network performance management.* ITU, 1999. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-E.437-199905-I!!PDF-E&type=items (дата звернення 20.09.2019).
7. *E.411: International network management – Operational guidance.* ITU, 2000. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-E.411-200003-I!!PDF-E&type=items (дата звернення 20.09.2019).
8. Исхаков С. Ю. Шелупанов А. А., Тимченко С. В. Прогнозирование в системе мониторинга локальных сетей. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.* 2012. № 1 (25), ч. 2. С. 100–103.
9. Szmit M., Adamus S., Szmit A., Bugała S. Implementation of Brutlag's algorithm in Anomaly Detection 3.0. *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. 2012. P. 685–691.
10. Имильбаев Р. Р., Крымский В. Г., Юнусов А. Р. Использование интервальных временных рядов для прогнозирования состояния газораспределительной сети. *Электротехнические и информационные комплексы и системы.* 2016. Т. 12, № 4. С. 62–72.
11. RFC 6228. Session Initiation Protocol (SIP) Response Code for Indication of Terminated Dialog. IETF, 2011. URL: https://tools.ietf.org/html/rfc6228 (дата звернення 20.09.2019).
12. Смидович Л. С. Обнаружение фрода и технических неисправностей в сетях VOIP. Тезисы III междунар. научно-технической конф. «Компьютерное моделирование и оптимизация сложных систем» (КМОСС-2017). Днепр, 2017. С. 228–229.
13. Brutlag J. D. Aberrant Behavior Detection in Time Series for Network Monitoring. *14th System Administration Conference*

Proceedings. New Orleans, 2000. P. 139–146. URL: http://www.usenix.org/events/lisa00/full_papers/brutlag/brutlag_html/ (дата звернення 20.09.2019).

References (transliterated)

1. *RFC 3261. SIP: Session Initiation Protocol.* IETF, 2002. Available at: https://tools.ietf.org/html/rfc3261 (accessed 20.09.2019).
2. Zaplotyns'kyy B. A. Polipshennya yakosti posluh u sferi telekomunikatsiy na osnovi vprovadzhennya pidkhodiv z upravlinnya yakistyu [Improving the telecommunications services quality through the quality management approaches implementation.]. *Ekonomika. Menedzhment. Biznes.* [Economy. Management. Business]. 2015, no. 1, pp. 30–38.
3. Sakharov A. V. *Statisticheskie modeli trafika IP-telefonii: avtoreferat dis. kandidata tekhnicheskikh nauk* [Statistical models of IP-telephony traffic: abstract of Candidate of Technical Sciences thesis]. Nizhniy Novgorod, Nizhny Novgorod State technical U. Publ., 2007. 16 p.
4. Ghiata N., Marcu M. Measurement methods for QoS in VoIP review. 3rd International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2011. Budapest, Hungary, 2011, pp 1–6.
5. *ETSI TS 102 024-2. Definition of Speech Quality of Service (QoS) Classes.* ETSI, 2003. Available at: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102000_102099/10202402/04.01.01_60/ts_10202402v040101p.pdf (accessed 20.09.2019).
6. *E.437: Comparative metrics for network performance management.* ITU, 1999. Available at: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-E.437-199905-I!!PDF-E&type=items (accessed 20.09.2019).
7. *E.411: International network management – Operational guidance.* ITU, 2000. Available at: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-E.411-200003-I!!PDF-E&type=items (accessed 20.09.2019).
8. Iskhakov S. Yu. Shelupanov A. A., Timchenko S. V. Prognozirovanie v sisteme monitoringa lokal'nykh setey [Forecasting in a LAN monitoring system]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics]. 2012, no. 1 (25), part 2, pp. 100–103.
9. Szmit M., Adamus S., Szmit A., Bugała S. Implementation of Brutlag's algorithm in Anomaly Detection 3.0. *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. 2012, pp. 685–691.
10. Imil'baev R. R., Krymskiy V. G., Yunusov A. R. Ispol'zovanie interval'nykh vremennykh ryadov dlya prognozirovaniya sostoyaniya gazoraspredelitel'noy seti [The use of interval time series to predict the gas distribution network status]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy* [Electrical and information systems]. 2016, vol. 12, no. 4, pp. 62–72.
11. RFC 6228. Session Initiation Protocol (SIP) Response Code for Indication of Terminated Dialog. IETF, 2011. Available at: https://tools.ietf.org/html/rfc6228 (accessed 20.09.2019).
12. Smidovych L. S. Obnaruzhenie froda i tehnicheskih neispravnostej v setjah VOIP [Detecting fraud and technical malfunctions in VOIP networks]. *Tezisy III mezhdunar. nauchno-tehnicheskoj konf. «Komp'juternoe modelirovanie i optimizacija slozhnyh sistem» (KMOSS-2017)* [Abstracts of III international scientific and technical conf. "Computer modeling and optimization of complex systems" (KMOSS-2017)]. Dnipro, 2017, pp. 228–229.
13. Brutlag J. D. Aberrant Behavior Detection in Time Series for Network Monitoring. *14th System Administration Conference Proceedings*. New Orleans, 2000, pp. 139-146. Available at: http://www.usenix.org/events/lisa00/full_papers/brutlag/brutlag_html/ (accessed 20.09.2019).

Надійшла (received) 05.11.2019

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

Смідович Леонід Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "ХАІ", доцент кафедри Комп'ютерних наук та інформаційних систем; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6156-9506; e-mail: lsonlinels@gmail.com

Смидович Леонид Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", доцент кафедры Компьютерных наук и информационных систем; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6156-9506; e-mail: lsonlinels@gmail.com

Smidovych Leonid Serhiyovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Aerospace University named after N. E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Associate Professor at the Department of Computer Science and Information Systems; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6156-9506; e-mail: lsonlinels@gmail.com

УДК 519.24 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.02**

А. А. ПАВЛОВ, М. Н. ГОЛОВЧЕНКО

ПОСТРОЕНИЕ ОДНОМЕРНОЙ И МНОГОМЕРНОЙ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ ПО ИЗБЫТОЧНОМУ ОПИСАНИЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассматривается задача построения многомерной полиномиальной регрессии по заданному ее избыточному описанию на основе результатов активного эксперимента. Избыточное описание означает включение в него членов, возможно, отсутствующих в структуре исследуемой регрессии. Таким образом, возникает проблема по результатам активного эксперимента не только оценить значения неизвестных коэффициентов многомерной полиномиальной регрессии, но и исключить из ее избыточного описания лишние члены. Решение поставленной задачи базируется на: (а) получении новых свойств коэффициентов нормированных ортогональных полиномов Форсайта; (б) возможности сведения задачи оценки неизвестных коэффициентов нелинейных членов многомерной полиномиальной регрессии к задаче оценки коэффициентов множества одномерных полиномиальных регрессий и решения соответствующих систем линейных равенств; (в) использовании метода для исключения лишних членов многомерной нелинейной полиномиальной регрессии, который органически включает в себя как методологию кластерного анализа, так и основную идею метода группового учета аргументов – разбиение экспериментальных данных на два множества, одно из которых не используется для оценок неизвестных коэффициентов многомерной полиномиальной регрессии, заданной избыточным описанием.

Ключевые слова: многомерная полиномиальная регрессия, нормированные ортогональные полиномы Форсайта, избыточное описание, метод группового учета аргументов, кластерный анализ, линейные равенства

О. А. ПАВЛОВ, М. М. ГОЛОВЧЕНКО

ПОБУДОВА ОДНОВИМІРНОЇ І БАГАТОВИМІРНОЇ ПОЛІНОМІАЛЬНОЇ РЕГРЕСІЇ ЗА НАДЛИШКОВИМ ОПИСОМ З ВИКОРИСТАННЯМ АКТИВНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Розглядається задача побудови багатовимірної поліноміальної регресії за її заданим надлишковим описом на основі результатів активного експерименту. Надлишковий опис означає включення в нього членів, можливо, відсутніх в структурі досліджуваної регресії. Таким чином, виникає проблема за результатами активного експерименту не тільки оцінити значення невідомих коефіцієнтів багатовимірної поліноміальної регресії, але і виключити з її надлишкового опису зайві члени. Розв'язання поставленої задачі базується на: (а) отриманні нових властивостей коефіцієнтів нормованих ортогональних поліномів Форсайта; (б) можливості зведення задачі оцінки невідомих коефіцієнтів нелінійних членів багатовимірної поліноміальної регресії до задачі оцінки коефіцієнтів множини одновимірних поліноміальних регресій і розв'язання відповідних систем лінійних рівностей; (в) використанні методу для виключення зайвих членів багатовимірної нелінійної поліноміальної регресії, який органічно включає в себе як методологію кластерного аналізу, так і основну ідею методу групового урахування аргументів – розбиття експериментальних даних на дві множини, одна з яких не використовується для оцінок невідомих коефіцієнтів багатовимірної поліноміальної регресії, заданої надлишковим описом.

Ключові слова: багатовимірна поліноміальна регресія, нормовані ортогональні поліноми Форсайта, надлишковий опис, метод групового урахування аргументів, кластерний аналіз, лінійні рівності

A. A. PAVLOV, M. N. HOLOVCHENKO

UNIVARIATE AND MULTIVARIATE POLYNOMIAL REGRESSION CONSTRUCTION FROM A REDUNDANT REPRESENTATION USING AN ACTIVE EXPERIMENT

We consider the problem of a multidimensional polynomial regression construction from a given redundant representation based on the results of an active experiment. Redundant representation means inclusion in it the members which are possibly absent in the structure of the studied regression. Thus, we have a problem not only to estimate the values of the unknown coefficients of multidimensional polynomial regression from the results of an active experiment, but also to eliminate the redundant members from its redundant representation. The solution to this problem is based on: (a) obtaining new properties of the coefficients of normalized orthogonal polynomials of Forsythe; (b) possibility of reducing the problem of estimating the unknown coefficients for nonlinear members of multivariate polynomial regression to the problem of estimating the coefficients for the set of univariate polynomial regressions and solving the corresponding systems of linear equalities; (c) using the method to eliminate the redundant members of multidimensional nonlinear polynomial regression which organically includes both the methodology of cluster analysis and the main idea of the group method of data handling – dividing the experimental data into two sets, one of which is not used to estimate unknown coefficients of multidimensional polynomial regression given by a redundant representation.

Keywords: multi-dimensional polynomial regression, normalized orthogonal polynomials of Forsythe, redundant representation, group method of data handling, cluster analysis, linear equalities

Введение. Решение задачи нахождения структуры и оценки коэффициентов исследуемой многомерной полиномиальной регрессии по ее избыточному описанию с использованием активного эксперимента основано на использовании результатов, полученных в [1–10], на основе метода, излагаемого ниже, использующего основные идеи метода группового учета аргументов А. Г. Ивахненко, а также кластерного анализа.

Излагаемые ниже результаты являются естественным обобщением алгоритмов построения одномерной и многомерной полиномиальной регрессии по избыточному описанию с использованием активного эксперимента, изложенных в [1–9]. Некоторые другие алгоритмы построения регрессионных моделей и их применения описаны в [11, 12].

Общие теоретические положения. В [1–10] рассмотрены две задачи регрессионного анализа:

1) Построение одномерной полиномиальной регрессии по избыточному описанию с использованием активного эксперимента.

Избыточное описание задано в виде

$$Y(x) = \theta_0 + \theta_1 x + \ldots + \theta_r x^r + E, \qquad (1)$$

где x – детерминированная переменная, к которой применим активный эксперимент. Имеется в виду, что

© А. А. Павлов, М. Н. Головченко, 2020

на вход объекта, модель которого представлена в виде (1), можно подавать любые действительные значения скалярного входа x и измерять выходное значение объекта $Y(x)$;

$\theta_0, \theta_1, \ldots, \theta_r$ – неизвестные коэффициенты, часть из которых, возможно, равна тождественно нулю;

E – случайная величина с произвольным распределением и нулевым математическим ожиданием ($ME = 0$) и конечной дисперсией. Проведено n экспериментов, в результате которых получены две выборки объема n $(x_i,\ i = \overline{1,n}; Y(x_i) = y_i,\ i = \overline{1,n})$. По результатам эксперимента необходимо исключить из (1) лишние члены и оценить оставшиеся коэффициенты θ_j ($\forall|\theta_j| > 0$ в описании (1)). Для решения этой задачи используется метод наименьших квадратов с использованием нормированных ортогональных полиномов Форсайта.

Общеизвестные результаты, изложенные в [5], позволяют получить следующие оценки $\widehat{\theta_j},\ j = \overline{0,r}$:

$$\widehat{\theta_j} = \widehat{\omega_r} q_{rj} + \ldots + \widehat{\omega_j} q_{jj},\quad j = \overline{0,r}, \tag{2}$$

где $\widehat{\omega_j}$ – оценки весовых коэффициентов, полученных методом наименьших квадратов с использованием нормированных ортогональных полиномов Форсайта;

q_{ij} – коэффициенты этих полиномов.

Дисперсии оценок имеют вид [5]:

$$D\left(\widehat{\theta_j}\right) = \sigma^2 \sum_{i=r}^{j} q_{ij}^2 . \tag{3}$$

Вычислительные эксперименты, приведенные в [7–9], показывают, что с увеличением j при фиксированном числе экспериментов на порядки уменьшается $D\widehat{\theta_j}$. Действительно, в проведенных экспериментах получили: при $n = 10$, $D\widehat{\theta_0} = \sigma^2 \cdot 0{,}40\ldots$, $D\widehat{\theta_1} = \sigma^2 \cdot$ $\cdot\, 0{,}0024\ldots$, $D\widehat{\theta_2} = \sigma^2 \cdot 4{,}26 \cdot 10^{-6}$, $D\widehat{\theta_3} = \sigma^2 \cdot 1{,}28 \cdot$ $\cdot\, 10^{-5}$. Предлагалось исключать из модели (1) члены, у которых оценки коэффициентов по модулю близки к нулю и исчезающе малы значения дисперсий оценок этих коэффициентов (использование закона трех сигм). Хотя использование нормированных ортогональных полиномов Форсайта облегчает решение проблемы вырожденности при использовании метода наименьших квадратов, однако, эта проблема остается, что приводит к необходимости проведения громоздких вычислений с использованием большой памяти для нахождения коэффициентов q_{ij} нормированных ортогональных полиномов Форсайта.

Любые упрощения в процессе вычисления коэффициентов $\{q_{ij}\}$, гарантирующих достоверность конечного результата, упрощают решение проблемы в целом.

В [9] приведены рекомендации по повышению эффективности проведения активного эксперимента для нахождения оценок коэффициентов одномерной полиномиальной регрессии по ее избыточному описанию. Обоснованность этих рекомендаций базируется на полученных в [3, 4] следующих теоретических результатах.

1) Если $q_{jl}^x,\ \forall j = \overline{0,r},\ \forall l = \overline{0,j}$, – это коэффициенты нормированных ортогональных полиномов Форсайта, вычисленных по $x_i,\ i = \overline{1,n}$, а $q_{jl}^z,\ \forall j = \overline{0,r},\ \forall l = \overline{0,j}$ – это коэффициенты нормированных ортогональных полиномов Форсайта, вычисленных по $z_i,\ i = \overline{1,n},\ z_i = kx_i,\ i = \overline{1,n},\ k > 0$, то

$$q_{jl}^z = \tfrac{1}{k^j} q_{jl}^x,\ D\widehat{\theta_j^z} = \sigma^2 \textstyle\sum_{l=r}^{j} \left(\tfrac{1}{k^j} q_{jl}^x\right) = \left(\tfrac{1}{k^j}\right)^2 D\widehat{\theta_j^x}.$$

2) Повторяющиеся эксперименты. Этот результат может быть использован только в случае, когда r – известная степень избыточного описания одномерной полиномиальной регрессии.

Пусть на вход объекта подается повторяющаяся последовательность значений $x_1, \ldots, x_{r+p}$, $x_1, \ldots, x_{r+p}, \ldots$, где $p > 1$. Оказывается [4], в этом случае не требуется нормированные ортогональные полиномы Форсайта строить по значениям $x_1, \ldots, x_{r+p}$, $x_1, \ldots, x_{r+p}, \ldots$ скалярного аргумента x, в котором последовательность чисел $x_1, \ldots, x_{r+p}$ повторяется l раз. Доказано [4], что оценки коэффициентов $\widehat{\theta_j},\ j = \overline{0,r}$, не изменяются при усреднении результатов экспериментов. Пусть

$$\boldsymbol{X} = (x_1,\ \ldots, x_n), n = k + p;$$

$$\boldsymbol{X'} = (x_{11}, x_{21},\ \ldots, x_{l1}, x_{12}, x_{22}, \ldots, x_{l2}, \ldots, x_{1n}, x_{2n},\ \ldots, x_{ln}),$$

где $x_{ki} = x_i, \forall k = \overline{1,l},\ \forall i = \overline{1,n}$;

$$\boldsymbol{Y'} = (y_{11}, y_{21},\ \ldots, y_{l1}, \ldots, y_{1n}, y_{2n},\ \ldots, y_{ln});$$

$$\boldsymbol{Y} = \left(\frac{\sum_{k=1}^{l} y_{k1}}{l}, \frac{\sum_{k=1}^{l} y_{k2}}{l}, \ldots, \frac{\sum_{k=1}^{l} y_{kn}}{l}\right),$$

где y_{ij} – это соответствующее значение выхода объекта в статистическом эксперименте.

Пусть $Q_j(x),\ j = \overline{0,r}$, – нормированные ортогональные полиномы Форсайта, построенные по выборке $\boldsymbol{X}$, а $Q_j'(x),\ j = \overline{0,r}$, – нормированные ортогональные полиномы Форсайта, построенные по выборке $\boldsymbol{X'}$. В [4] показано, что

$$Q_j'(x) = \frac{Q_j(x)}{\sqrt{l}}, j = \overline{0,r}, \left(x_{ki} = x_i, k = \overline{1,l}\right).$$

Из этого следует [4], что оценки $\widehat{\theta_j'} = \widehat{\theta_j},\ j = \overline{0,r}$, где $\widehat{\theta_j'}$ получены по $\boldsymbol{X'}$,$\boldsymbol{Y'}$, а $\widehat{\theta_j}$ – по $\boldsymbol{X}$,$\boldsymbol{Y}$. Задача регрессии по $\boldsymbol{X}$,$\boldsymbol{Y}$ имеет вид

$$Y(x) = \theta_0 + \theta_1 x + \ \ldots + \theta_r x^r + E_1,$$

где x принимает значения $x_1,\ \ldots, x_n, n = r + p, p\ \geq 1$, $DE_1 = \sigma^2/l$.

Таким образом [3, 4], варьируя параметрами нахождения наиболее эффективной области, из которой выбираются значения $x_1, \ldots, x_n$, выбрав l – количество повторов серий, решив проблему нахождения практически достоверных значений коэффициентов нормированных ортогональных полиномов Форсайта, можем до проведения активного эксперимента гарантировать

получение необходимых значений дисперсий $D\widehat{\theta_j}$, $j = \overline{0,r}$, на минимальном объеме данных.

Построение многомерной полиномиальной регрессии по избыточному описанию с использованием активного эксперимента. Пусть избыточное описание многомерной функции имеет вид [6]:

$$\overline{y}(\overline{x}) = \sum_{\forall(i_1,\dots,i_t)\in K,\ \forall(j_1,\dots,j_t)\in K(i_1,\dots,i_t)} b_{i_1,\dots,i_t}^{j_1,\dots,j_t}\left(x_{i_1}\right)^{j_1}\left(x_{i_2}\right)^{j_2}\cdots\left(x_{i_t}\right)^{j_t} + E, \qquad (4)$$

где $\overline{x} = (x_1, \dots, x_n)^{\mathrm{T}}$ – детерминированный вектор входных переменных;

$b_{i_1,\dots,i_t}^{j_1,\dots,j_t}$ – неизвестные коэффициенты;

j_i – натуральные числа;

i_j – натуральные индексы из множеств $\{1, \dots, n\}$;

E – случайная величина с нулевым математическим ожиданием и ограниченной неизвестной дисперсией.

В [1, 4] показано, что проводя активный эксперимент для случаев, когда а) $x_1 = x_2 = \dots = x_n = x$; б) фиксируется x_i, $i = \overline{1,n}$, остальные переменные $x_1 = x_2 = \dots = x_{i-1} = x_{i+1} = \dots = x_n = x$ изменяются одинаково, во многих случаях решая последовательные задачи построения одномерных полиномиальных регрессий и соответствующих систем линейных равенств, находят оценки всех коэффициентов многомерной регрессии при нелинейных членах, тем самым сводя исходную задачу к задаче построения многомерной линейной регрессии с использованием активного эксперимента, которая, как известно, легко решается.

Проблема исследования. 1) Верхние границы дисперсий оценок $\hat{b}_{i_1,\dots,i_t}^{j_1,\dots,j_t}$ (являющиеся результатом решения систем линейных неравенств, правые части которых являются оценками коэффициентов соответствующих одномерных дисперсий [1, 2, 6]) являются достаточно грубыми, и достоверно оценить, какие члены избыточного описания многомерной регрессии (4) в истинном ее выражении отсутствуют, не представляется возможным.

2) Та же проблема возникает при построении одномерной полиномиальной регрессии, если значение $D\widehat{\theta_j}$ таково, что с учетом закона трех сигм (случайная величина E распределена произвольно) вероятность утверждения того, что $\theta_j = 0$, существенно меньше единицы.

Сформулированная в данной статье проблема решается с помощью модификации изложенного выше метода построения одномерной и многомерной полиномиальной регрессии по ее избыточному описанию с применением активного эксперимента [1–9], которая базируется:

а) на основной идее метода группового учета аргументов А. Г. Ивахненко [10] (разбиение экспериментальных данных на множество данных, по которым находятся оценки неизвестных коэффициентов, и проверочное множество данных, в этом построении не участвующих);

б) на базовых идеях кластерного анализа.

Модифицированный метод построения одномерной и многомерной полиномиальной регрессии по избыточному описанию с использованием активного эксперимента.

Примечание. Если в избыточном описании многомерной полиномиальной регрессии переменные x_{i_p}, $p = \overline{1,k}$, в члены, их содержащие, входят в виде $1/x_{i_p}$, то заменой $1/x_{i_p} = z_{i_p}$, $p = \overline{1,k}$, эту задачу сводим к предыдущей.

1.1. Находим выражение для многомерной полиномиальной регрессии по ее избыточному описанию с использованием активного эксперимента, в полном соответствии с теоретическими положениями, изложенными в [1–9]. При этом предполагается, что найдены оценки коэффициентов при всех нелинейных членах регрессии, а оценки коэффициентов при переменных x_i, $i = \overline{1,n}$, найдены обычным методом наименьших квадратов для линейной многомерной регрессии.

1.2. Реализуем активный эксперимент в области изменения аргументов, в которой наиболее вероятно будет эксплуатироваться модель; желательно, при выполнении условия $\forall_i |x_i| > 1$. В этом случае, нелинейные члены построенной многомерной полиномиальной регрессии не принимают малых значений (члены, у которых $\left|\hat{b}_{i_1,\dots,i_t}^{j_1,\dots,j_t}\right| \approx 0$, предварительно исключены). Множество значений аргументов и выходной величины обозначим через $\boldsymbol{XY} = \{\overline{x_l} y_l\}$, $l = \overline{1,p}$. Все члены многомерной полиномиальной регрессии (кроме линейных $b_i x_i, i = \overline{1,n}$) вида $\hat{b}_{i_1,\dots,i_t}^{j_1,\dots,j_t}\left(x_{i_1}\right)^{j_1}\cdots\left(x_{i_t}\right)^{j_t}$ переименуем $J_i, i = \overline{1,L}$, в порядке убывания величин $\sum_{l=1}^{p}\left|\hat{b}_{i_1,\dots,i_t}^{j_1,\dots,j_t}\left(x_{i_1 l}\right)^{j_1}\left(x_{i_2 l}\right)^{j_2}\cdots\left(x_{i_t l}\right)^{j_t}\right|$, где $x_{i_1 l}, \dots, x_{i_t l}$ – значения детерминированных величин $x_{i_1}, \dots, x_{i_t}$ в l-м эксперименте, $l = \overline{1,p}$.

2.1. Разбиваем множество $\{J_i, i = \overline{1,L}\}$ на два класса M_1 и M_2 следующим образом.

2.1.1. $J_1 \in M_1, J_L \in M_2$. Если

$$J_1 - J_2 < J_2 - J_L, \qquad (5)$$

то $J_2 \in M_1$, в противном случае $J_2 \in M_2$. Получено разбиение множества $\{J_i, i = \overline{1,L}\}$ на классы: $M_1 = \{J_1\}$, $M_2 = \{J_2, \dots, J_L\}$.

2.1.2. Если

$$J_{L-1} - J_L < \frac{1}{2}(J_1 + J_2) - J_{L-1}, \qquad (6)$$

то $J_{L-1} \in M_2$, в противном случае $J_{L-1} \in M_1$, Получено окончательное разбиение: $M_1 = \{J_1, J_2, \dots, J_{L-1}\}$, $M_2 = \{J_L\}$.

2.1.3. Описанная выше процедура продолжается, если выполнены неравенства (5), (6). $(t-1)$-й шаг: $M_1 = \{J_1, \dots, J_{t-1}\}$, $M_2 = \{J_L, J_{L-1}, \dots, J_{L-t+1}\}$. Если выполняется неравенство

$$\frac{1}{t-1}\sum_{i=1}^{t-1} J_i - J_t < J_t - \frac{1}{t-1}\sum_{j=0}^{t-1} J_{L-j}, \qquad (7)$$

то $J_t \in M_1$, в противном случае $J_t \in M_2$, Текущее разбиение множества $\{J_i, i = \overline{1,L}\}$ на два класса получено: $M_1 = \{J_i, i = \overline{1,t-1}\}$, $M_2 = \{J_{L-j}, j = \overline{0,t-1}, J_t\}$. Если (7) выполнено, то если выполняется условие

$$J_{L-t} - \frac{1}{t-1}\sum_{j=0}^{t-1} J_{L-j} < \frac{1}{t-1}\sum_{i=1}^{t-1} J_i - J_{L-t},$$

то $J_{L-t} \in M_2$, в противном случае $J_{L-t} \in M_1$, Текущее разбиение множества $\{J_i, i = \overline{1,L}\}$ на два класса завершено: $M_1 = \{J_i, i = \overline{1,t-1}, J_{L-t}\}$, $M_2 = \{J_{L-j}, j = \overline{0,t-1}\}$.

Описанная процедура конечна и завершается текущим разбиением множества $\{J_i, i = \overline{1,L}\}$ на два класса M_1 и M_2.

2.2. Аналогичной процедурой множество M_2 разбивается на два класса, получаем M_1, M_2^1, M_2^2. Множество M_2^2 аналогичной процедурой разбивается на два класса M_3^1, M_3^2, и т. д. Эта процедура является конечной. В результате получаем окончательное разбиение множества $\{J_i, i = \overline{1,L}\}$ на классы: $M_1,\ M_2^1,\ M_3^1,\ \ldots, M_T^1$. Возможна ситуация, когда M_T^1 содержит один либо два элемента. В этом случае $M_T^1 = M_{T-1}^2$.

3.1. Задаем первый параметр управления вычислительным процессом Δ_1 и находим максимальное натуральное число T_1, для которого выполняется

$$\min\{\forall J_i \in M_{T_1-1}^1\} - \max\{\forall J_i \in M_{T_1}^1\} \geq \Delta_1 \qquad (8)$$

(Δ_1 – достаточно большое число). Если T_1 найдено, то находятся две среднеквадратичные ошибки

$$\sigma^2(f_1) = \sum_{l=1}^{p}\left(y_l - f_1(\overline{x_l})\right)^2,$$
$$\sigma^2(f_2) = \sum_{l=1}^{p}\left(y_l - f_2(\overline{x_l})\right)^2,$$

где $f_1(\overline{x})$ – построенная в п. 1 полиномиальная регрессия;

$f_2(\overline{x})$ получена из $f_1(\overline{x})$ исключением из нее всех элементов из классов $M_T^1,\ \ldots, M_{T_1}^1$.

Если

$$\sigma^2(f_2) \leq \sigma^2(f_1), \qquad (9)$$

то текущее выражение для полиномиальной регрессии равно $f_2(\overline{x})$. Вводится второй параметр управления вычислительным процессом Δ_2 (Δ_2 может равняться Δ_1) и описанная выше процедура повторяется до тех пор, пока либо не выполнится условие (8), либо нарушится неравенство (9). Пусть $f_t(\overline{x})$ – это текущее выражение полиномиальной регрессии, для которого либо не выполнялось текущее условие вида (8), либо нарушилось неравенство вида (9).

3.2. Пусть $f_t(\overline{x})$ содержит члены из классов {линейные члены} $\cup \{M_1,\ M_2^1,\ \ldots, M_t^1\}$.

3.2.1. Из $f_t(\overline{x})$ исключаются члены множества M_t^1. Обозначим ее $f_t^1(\overline{x})$. Если выполняется

$$\sigma^2(f_t^1) \leq \sigma^2(f_t), \qquad (10)$$

то из $f_t(\overline{x})$ исключаются члены множества M_t^1, и она обозначается $f_{t+1}(\overline{x})$. Описанная процедура продолжается до первого нарушения неравенства вида (10).

3.2.2. Пусть неравенство вида (10) нарушено для полиномиальной регрессии, содержащей {линейные члены} $\cup \{M_1,\ M_2^1,\ \ldots, M_{t-k}^1\}$. Тогда конструируем полиномиальные регрессии из класса {линейные члены} $\cup \{M_1\} \cup \{M_2^1\} \cup \ldots \cup \{M_{t-k-1}^1\}$, включая в них все возможные комбинации элементов M_{t-k}^1 (в первую очередь, исключая минимальные по величине члены), и для каждой комбинации проверяем выполнение неравенства вида (10). В случае его выполнения соответствующие элементы из M_{t-k}^1 исключаются. После проверки всех комбинаций элементов из M_{t-k}^1 описанная процедура повторяется для множеств M_{t-k+1}^1 и т. д. Вычислительная процедура выполнена либо когда окончилось время, выделенное для работы алгоритма, либо когда в результате перебора всех комбинаций исследуемое текущее множество M_p^1 осталось без изменений.

4. Пусть $f(\overline{x})$ – это результирующее выражение для многомерной полиномиальной регрессии. Тогда, считая все ее нелинейные члены известными, методом наименьших квадратов для многомерной линейной регрессии повторно оцениваем коэффициенты при ее линейных членах.

5. В случае, когда для проверочных данных возможен активный эксперимент в области $\forall_i |x_i| > 1$, считая все нелинейные члены известными, п.п. 1–3 реализуем только для линейных членов многомерной регрессии, оценки коэффициентов в которых были получены в п. 4.

Выводы. В статье изложен метод нахождения структуры и оценки коэффициентов исследуемой многомерной полиномиальной регрессии, заданной избыточным описанием с использованием активного эксперимента. Метод основан на:

1) свойствах нормированных ортогональных полиномов Форсайта [3, 4];

2) возможности сведения получения оценок коэффициентов многомерной полиномиальной регрессии, заданной избыточным описанием, к последовательному построению одномерных полиномиальных регрессий и соответствующих систем линейных уравнений [1–9] и метода исключения избыточных членов, основанного на основных идеях метода группового учета аргументов, а также кластерного анализа.

Список литературы

1. Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. *Combinatorial Optimization Problems in Planning and Decision Making: Theory and Applications*. Cham (Switzerland): Springer, 2019. 526 p. doi: 10.1007/978-3-319-98977-8
2. Згуровский М. З., Павлов А. А. *Трудноре шаемые задачи комбинаторной оптимизации в планировании и принятии решений*. Київ: Наук. думка, 2016. 716 с.
3. Павлов А. А., Калашник В. В. Рекомендации по выбору зоны проведения активного эксперимента для одномерного полиномиального регрессионного анализа. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка»*. Київ: "ВЕК+", 2014. № 60. С. 41–45.

4. Павлов А. А., Калашник В. В., Коваленко Д. А. Построение многомерной полиномиальной регрессии. Регрессия с повторяющимися аргументами во входных данных. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка»*. Київ: "ВЕК+", 2015. № 62. С. 57–61
5. Худсон Д. *Статистика для физиков: Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике*. 2-е изд. Москва: Мир, 1970. 296 с.
6. Згуровский М. З., Павлов А. А. *Принятие решений в сетевых системах с ограниченными ресурсами*. Київ: Наук. думка, 2010. 573 с.
7. Павлов А. А., Чеховский А. В. Построение многомерной полиномиальной регрессии. Активный эксперимент. *Системні дослідження та інформаційні технології*, 2009, № 1. С. 87–99
8. Павлов А. А., Чеховский А. В. Построение многомерной полиномиальной регрессии. Активный эксперимент с ограничениями. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Системный анализ, управление и информационные технологии*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. № 4. С. 174–186.
9. Павлов А.А., Чеховский А.В. Сведение задачи построения многомерной регрессии к последовательности одномерных задач. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка»*. Київ: "ВЕК+", 2008. № 48. С. 111–112.
10. *Ивахненко А.Г.* Моделирование сложных систем. Киев: Вища школа, 1987.
11. Настенко Е., Павлов В., Бойко Г., Носовец О. Многокритериальный алгоритм шаговой регрессии. *Біомедична інженерія і технологія*, 2020. № 3, С. 48–53. doi: 10.20535/2617-8974.2020.3.195661
12. Коваленко Д. А. Застосування принципів багатовимірної поліноміальної регресії для розвідувального аналізу даних та знаходження лінії регресії. *Науковий огляд*, 2018. Том 3, № 46, С. 81–94.

References (transliterated)

1. Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. *Combinatorial Optimization Problems in Planning and Decision Making: Theory and Applications*. Cham: Springer Publ., 2019. 526 p. doi: 10.1007/978-3-319-98977-8
2. Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. *Trudnoreshaemye zadachi kombinatornoj optimizacii v planirovanii i prinjatii reshenij* [Intractable combinatorial optimization problems in planning and decision making]. Kiev, Nauk. dumka Publ. 716 p.
3. Pavlov A. A., Kalashnik V. V. Rekomendacii po vyboru zony provedenija aktivnogo jeksperimenta dlja odnomernogo polinomial'nogo regressionnogo analiza [Recommendations for choosing the zone of an active experiment for one-dimensional polynomial regression analysis]. *Visnyk NTUU "KPI". Seriya «Informatyka, upravlinnya ta obchislyuvalna tekhnyka».* Kiev, "Vek+" Publ., 2014, no. 60, pp. 41–45
4. Pavlov A. A., Kalashnik V. V., Kovalenko D. A. Postroenie mnogomernoj polinomial'noj regressii. Regressija s povtorjajushhimisja argumentami vo vhodnyh dannyh [Multidimensional polynomial regression construction. Regression with duplicate arguments in the input]. *Visnyk NTUU "KPI". Seriya «Informatyka, upravlinnya ta obchislyuvalna tekhnyka».* Kiev, "Vek+" Publ., 2015, no. 62, pp. 57–61
5. Hudson D.J. Statistics Lectures, Volume 2: Maximum Likelihood and Least Squares Theory. CERN Reports 64(18). Geneva, CERN, 1964. (Russ. ed.: Hudson D. *Statistika dlja fizikov: Lekcii po teorii verojatnostej i jelementarnoj statistike*. Moscow, Mir Publ., 1970. 296 p.). doi: 10.5170/CERN-1964-018
6. Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. *Prinyatie resheniy v setevykh sistemakh s ogranichennymi resursami* [Decision making in network systems with limited resources]. Kiev, Nauk. dumka Publ., 2010, 573 p.
7. Pavlov A. A., Chekhovskiy A. V. Postroenie mnogomernoj polinomial'noj regressii. Aktivnyj jeksperiment [Multidimensional polynomial regression construction. Active experiment]. *System research and information technologies*, 2009, no. 1, pp. 87–99
8. Pavlov A. A.., Chekhovskiy A. V. Postroenie mnogomernoj polinomial'noj regressii. Aktivnyj jeksperiment s ogranichenijami [Multidimensional polynomial regression construction. Active experiment with limitations]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2009, no. 4, pp. 174–186
9. Pavlov A. A., Chekhovskiy A. V. Svedenie zadachi postroenija mnogomernoj regressii k posledovatel'nosti odnomernyh zadach [Reducing the problem of multivariate regression constructing to a sequence of one-dimensional problems]. *Visnyk NTUU "KPI". Seriya «Informatyka, upravlinnya ta obchislyuvalna tekhnyka».* Kiev, "Vek+" Publ., 2008, no. 48, pp. 111–112
10. Ivahnenko A.G. Modelirovanie slozhnyh sistem. Kiev, Vyshha shkola Publ., 1987
11. Nastenko E., Pavlov V., Boyko G., Nosovets O. Mnogokriterial'nyj algoritm shagovoj regressii. *Biomedychna inzheneriya i tekhnolohiya* [Biomedical ingeneering and technology]. 2020, no. 3, pp. 48–53. doi: 10.20535/2617-8974.2020.3.195661
12. Kovalenko D. A. Zastosuvannya pryntsypiv bahatovymirnoyi polinomial'noyi rehresiyi dlya rozviduval'noho analizu danykh ta znakhodzhennya liniyi rehresiyi [Applying multiple polynomial regression principles for exploratory data analysis and regression analysis]. *Scientific Review*, vol. 3, no. 46, 2018, pp. 81–94.

Поступила (received) 11.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Павлов Олександр Анатолійович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри Автоматизованих систем обробки інформації та управління; м. Київ, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6524-6410; e-mail: pavlov.fiot@gmail.com

Головченко Максим Миколайович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», асистент кафедри Автоматизованих систем обробки інформації та управління; м. Київ, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9575-8046; e-mail: ma4ete25@ukr.net

Павлов Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», заведующий кафедрой Автоматизированных систем обработки информации и управления; г. Киев, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6524-6410; e-mail: pavlov.fiot@gmail.com

Головченко Максим Николаевич – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», ассистент кафедры Автоматизированных систем обработки информации и управления; г. Киев, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9575-8046; e-mail: ma4ete25@ukr.net

Pavlov Alexander Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Head of Department of Computer-Aided Management and Data Processing Systems; Kyiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6524-6410; e-mail: pavlov.fiot@gmail.com

Holovchenko Maxim Nikolaevich – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Assistant of Department of Computer-Aided Management and Data Processing Systems; Kyiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9575-8046; e-mail: ma4ete25@ukr.net

УДК 004.891.3 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.03**

О. В. ЧАЛА

МОДЕЛЬ УЗАГАЛЬНЕНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТЕМПОРАЛЬНИХ ЗНАНЬ ДЛЯ ЗАДАЧ ПІДТРИМКИ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ

Предметом дослідження є процеси побудови та використання темпоральних знань, які визначають порядок реалізації управлінських рішень в рамках організаційного управління. Мета полягає в розробці моделі представлення темпоральних знань для визначення послідовності управляючих дій у часі в рамках управлінського рішення з урахуванням рівня організаційної ієрархії, на якому реалізуються ці дії. Для досягнення цієї мети вирішуються задачі структуризації факторів, що визначають відмінності представлення та використання темпоральних знань, а також розробки узагальненої моделі темпоральних знань для підтримки управлінських рішень. Показано, що ключові відмінності темпоральних залежностей від каузальних пов'язані із використанням комбінації формальних і неформальних знань виконавців щодо причинно-наслідкових залежностей між управляючими діями у складі управлінського рішення для побудови послідовності дій у часі, а також ймовірнісними властивостям темпоральних відношень. Запропоновано модель узагальненого представлення темпоральних знань, призначену для підтримки управлінських рішень. Модель містить у собі множину узагальнених фактів, а також темпоральні та ієрархічні відношення між цими фактами. Факти відображають відомі стани об'єкту управління. Кожен узагальнений факт формується на основі кон'юнкції елементарних фактів. Елементарний факт задає значення певної властивості об'єкту управління. Темпоральні відношення визначають послідовність фактів у часі. Рівень організаційної ієрархії щодо фактів задається з використанням логічних операцій. У практичному плані запропонована модель орієнтована на побудову темпоральної бази знань. Вивід на такій базі знань дає можливість визначити ймовірні послідовності управляючих дій, які приводять до послідовності переходів між станами, що дозволяють досягти цільового стану об'єкту управління. Це дає можливість сформувати набір можливих альтернативних варіантів реалізації управлінського рішення в разі виникнення аномальних станів об'єкта управління.

Ключові слова: темпоральна база знань; темпоральні правила; логічні факти; послідовність станів об'єкту управління.

О. В. ЧАЛАЯ

МОДЕЛЬ ОБОБЩЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТЕМПОРАЛЬНЫХ ЗНАНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Предметом исследования являются процессы построения и использования темпоральных знаний, которые определяют порядок реализации управленческих решений в рамках организационного управления. Цель заключается в разработке модели представления темпоральных знаний для определения последовательности управляющих действий во времени в рамках управленческого решения с учетом уровня организационной иерархии, на котором реализуются эти действия. Для достижения этой цели решаются задачи структуризации факторов, определяющих различия представления и использования темпоральных знаний, а также разработки обобщенной модели темпоральных знаний для поддержки управленческих решений. Показано, что ключевые отличия темпоральных зависимостей от каузальных связаны с использованием комбинации формальных и неформальных знаний исполнителей о причинно-следственных зависимостях между управляющими действиями в составе управленческого решения для построения последовательности действий во времени, а также вероятностными свойствам темпоральных отношений. Предложена модель обобщенного представления темпоральных знаний, предназначенная для поддержки управленческих решений. Модель включает в себя множество обобщенных фактов, а также набор темпоральных и иерархических отношений между этими фактами. Факты отражают известные состояния объекта управления. Каждый обобщенный факт формируется на основе конъюнкции элементарных фактов. Элементарный факт задает значение определенного свойства объекта управления. Темпоральные отношения определяют последовательность фактов во времени. Уровень организационной иерархии для фактов отображается с использованием логических операций. В практическом плане предложенная модель ориентирована на построение темпоральной базы знаний. Вывод на такой базе знаний дает возможность определить вероятные последовательности управляющих действий, которые приводят к последовательности переходов между состояниями, позволяющий достичь целевого состояния объекта управления. Это дает возможность сформировать набор возможных альтернативных вариантов реализации управленческого решения в случае возникновения аномальных состояний объекта управления.

Ключевые слова: темпоральная база знаний; темпоральные правила; логические факты; последовательность состояний объекта управления.

O. V. CHALA

MODEL OF GENERALIZED REPRESENTATION OF TEMPORAL KNOWLEDGE FOR TASKS OF SUPPORT OF ADMINISTRATIVE DECISIONS

The subject of the research is the processes of building and using temporal knowledge, which determine the order of implementation of managerial decisions within the framework of organizational management. The goal is to develop a temporal knowledge representation model to determine the sequence of control actions over time as part of a management decision, taking into account the level of the organizational hierarchy at which these actions are implemented. To achieve this goal, the problems of structuring the factors determining the differences in the presentation and use of temporal knowledge, as well as the development of a generalized model of temporal knowledge to support managerial decisions, are solved. It is shown that the key differences between temporal and causal dependencies are associated with the use of a combination of formal and informal knowledge of performers about causal relationships between control actions as part of a management decision to build a sequence of actions in time, as well as the probabilistic properties of temporal relationships. A generalized model of temporal knowledge is proposed, designed to support managerial decisions. The model includes many generalized facts, as well as a set of temporal and hierarchical relationships between these facts. Facts reflect known states of the control object. Each generalized fact is formed on the basis of a conjunction of elementary facts. An elementary fact sets the value of a certain property of a control object. Temporal relationships determine the sequence of facts over time. The organizational hierarchy level for facts is set using logical operations. In practical terms, the proposed model is focused on building a temporal knowledge base. Conclusion based on such a knowledge base makes it possible to determine the probable sequence of control actions that lead to a sequence of transitions between states, which allows achieving the target state of the control object. This makes it possible to form a set of possible alternative options for implementing a managerial decision in the event of abnormal conditions of the control object.

Keywords: emporal knowledge base; temporal rules; logical facts; the sequence of states of the control object.

© О. В. Чала, 2020

Вступ. Управлінські рішення (УР) дають можливість реалізувати управління організаційною системою цілому, а також окремими технологічними, економічними, інформаційними процесами в умовах невизначеності щодо стану об'єкту управління (ОУ) та зовнішнього середовища [1, 2]. Підтримка прийняття управлінських рішень полягає у формуванні упорядкованої за заданим критерієм ефективності множини альтернативних послідовностей дій, що забезпечують розв'язання поточної задачі управління. Такий набір допустимих варіантів управлінського рішення дає можливість спростити вибір ОПР.

Підтримка управлінських рішень передбачає послідовне вирішення задач виявлення аномального стану об'єкту управління, побудови моделі комплексного управлінського рішення, а також вибору ОПР та подальшу реалізацію однієї з альтернатив у складі управлінського рішення [3, 4]. Сукупність цих задач складає єдиний ітеративний процес, що передбачає поетапне коригування управлінського рішення з використанням знань про процес управління та даних щодо послідовності станів об'єкту управління у часі. Даний процес є знання-ємним, тобто містить у собі гнучку послідовність процедур, яка змінюється на основі знань про причинно-наслідкові залежності між управляючими діями.

Автоматизована підтримка цього процесу базується на використанні запропонованої в роботі [5] темпоральної моделі комплексного управлінського рішення. Дана модель містить у собі множину можливих послідовностей управляючих дій та станів об'єкту управління, що виникають в результаті виконання дій. Кожна з таких послідовностей направлена на досягнення цільового стану об'єкту управління. Вказані послідовності управляючих дій формуються на основі темпоральних знань. Ці знання відображають упорядкованість управляючих дій у часі. Отримана послідовність дій відображає каузальні зв'язки між ними (або між відповідними станами ОУ). Каузальні зв'язки задаються як на основі формальних знань про технологічні та бізнес-процеси, так і з використанням персональних знань висококваліфікованих виконавців, або «knowledge workers» [6] та ОПР. Тому такі причинно-наслідкові залежності не завжди можуть бути формалізовані для використання у базі знань в системі підтримки управлінських рішень. З іншого боку, темпоральні залежності можуть бути отримані на основі аналізу баз даних та журналів подій систем обробки транзакцій та інформаційно-управляючих систем, що свідчить про можливість автоматизованого формування та подальшого використання темпоральних знань в системах підтримки прийняття рішень.

Таким чином, проблема побудови узагальненого формального опису темпоральних знань для автоматизованої підтримки управлінських рішень є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання автоматизованої побудови залежностей, що відображають ймовірнісні зв'язки у предметній області, та подальшого використання отриманих знань в інформаційно-пошукових системах були досліджені в роботах [7-9]. Однак в цих публікаціях темпоральний аспект розглядався лише при побудови декларативних знань, пов'язаних із фактами виникнення подій у визначені моменти часу. Використання темпоральних відношень при побудові процедурних знань було розглянуто в роботі [10]. В роботах [11, 12] були визначені темпоральні правила окремих типів. В роботі [13] запропоновано метод логічного виводу на цих правилах. В роботі [3] розглянуто можливості практичного застосування темпоральних правил при вирішенні першої задачі підтримки управлінських рішень – виявлення аномальної поведінки об'єкту управління.

Однак розглянуті моделі та методи приділяють увагу в першу чергу опису та практичному використанню окремих темпоральних залежностей для вирішення задач підтримки рішень при управлінні, виявленні атак в компьютерних мережах та рекомендаційних системах, тощо. В той же час, питання побудови єдиного формального опису темпоральних знань для забезпечення ймовірнісного виводу на основі множини типових темпоральних правил, що враховують темпоральні відношення та структурні особливості об'єкту управління, потребують подальшого вирішення.

Метою цієї статті є розробка моделі представлення темпоральних знань, що визначають послідовність управляючих дій та відповідної зміни станів об'єкту управління у часі з урахуванням рівня організаційної ієрархії, на якому реалізуються ці дії.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі:

– структуризація факторів, що визначають відмінності представлення та використання темпоральних знань;

– розробка узагальненої моделі представлення темпоральних знань.

Модель представлення темпоральних знань для підтримки управлінських рішень.

Представлення темпоральних знань щодо процесу підтримки управлінських рішень має враховувати такі відмінності цих знань та особливості їх використання:

– формування темпоральних правил виконується на основі використання комбінації формальних, а також неформальних знань виконавців щодо каузальних залежностей між управляючими діями;

– темпоральних знання мають ймовірнісний характер;

– темпоральні правила ітеративно уточняються в у дискретному часі з на основі інформації про поточний стан об'єкту управління;

– рівень грануляції темпоральних знань відповідає рівню організаційної ієрархії ОУ.

Перша характеристика темпоральних знань показує, що вони можуть бути використані для відображення упорядкованості управляючих дій у часі незалежно від причин виникнення відповідних послідовностей станів об'єкту управління. Тобто такі залежності дають можливість описати як явні, так і неявні персональні знання висококваліфікованих виконавців та ОПР.

Друга характеристика показує, що темпоральні знання лише відображають реалізацію детермінованих причинно-наслідкових залежностей між станами об'єкту управління та відповідними управляючими діями. Важливість або вага темпорального правила визначається кількістю реалізацій цього правила при виконанні управлінських рішень. Чим частіше був використаний порядок у часі, який задається темпоральним правилом, тим більше його загальність і, відповідно, важливість при формуванні нових управлінських рішень.

Третій фактор визначає особливості використання темпоральних знань для підтримки управлінських рішень у реальному часі. У процесі підтримки у автоматизованому режимі вирішуються задачі виявлення проблемної ситуації, представленої аномальним станом ОУ, а також задачі формування набору можливих альтернативних послідовностей дій у складі управлінського рішення. Тобто у процесі підтримки база темпоральних знань має бути доповнена новими, актуальними залежностями, що відображають останні управляючі дії.

Фактори, що були розглянуті, визначають можливість формування такої послідовності управляючих дій у часі, що дають можливість досягти цільового стану об'єкту управління.

Останній, четвертий фактор враховує не темпоральний, а організаційний аспект у формі ієрархічного опису послідовностей управляючих дій згідно рівня організаційної ієрархії. Така ієрархія задається через зв'язок між виконавцями та підрозділами в рамках організації в цілому.

Запропонована модель узагальненого представлення темпоральних знань базується на визначенні загальних фактів щодо стану об'єкту управління, а також темпоральних та ієрархічних відношень між цими фактами. Факти та відношення між ними дають можливість описати як декларативні, так і процедурні знання. Сукупність загальних фактів в цілому визначає декларативний аспект темпоральних знань. Загальні факти складаються із елементарних фактів. Елементарний факт задає одну із властивостей стану ОУ. Він відображає набуття змінною, що характеризує об'єкт управління, одного значення із дискретної множини значень:

$$g(a_k) = v_{k,l} \Rightarrow \varphi_{k,l} = \text{true}, \qquad (1)$$

де a_k – атрибут стану ОУ, що визначає його елементарну властивість;

$v_{k,l} \in V_k$ – поточне значення атрибуту.

Приклад елементарного факту: «код товару, що обробляється в поточний момент, становить prod17».

Кожен факт $f_j \in F$ є фактом виникнення стану s_j об'єкту управління, задається кон'юнкцією елементарних фактів і представляється таким чином:

$$f_j = \varphi_{1,l} \wedge \varphi_{2,l} \wedge \ldots \wedge \varphi_{K,l} | \tau = \tau_j, \qquad (2)$$

де $\varphi_{k,l}$ – елементарний факт, що визначає одну із властивостей стану об'єкту управління;

τ_j – момент часу, коли загальний факт f_j виникнення стану s_j стає істинним.

Таким чином, загальний факт f_j стає істинним лише у такий дискретний момент часу, коли підмножина змінних, що характеризують стан об'єкту управління, приймає визначені елементарними фактами $\varphi_{k,l}$ значення. Зазначене свідчить що, сукупність фактів f_j з урахуванням атрибуту часу є декларативними знаннями про стан об'єкту управління.

На базі визначення (2) факти виникнення станів об'єкту управління у складі темпоральних знань можуть бути задані єдиним чином, без урахування відмінностей у описі предметної області. Це дає можливість побудувати однотипний опис альтернативних варіантів реалізації управлінського рішення. Стандартизований опис аналогічних фактів дає можливість зіставляти їх для різних альтернатив і в подальшому виділяти одні й ті ж стани для різних реалізацій управлінського рішення. Виділення однакових станів для різних послідовностей управляючих дій дає можливість знайти однакові темпоральні залежності, що характеризують різні варіанти управлінського рішення. Ці варіанти могли бути реалізовані у різних періодах часу. Однак при побудові темпоральних залежностей достатньо враховувати відносний порядок фактів у кожній альтернативі, а не порівнювати абсолютні значення часу виникнення відповідних станів s_j.

В цілому набір станів об'єкту управління з позицій підтримки управлінських рішень може бути розділений на підмножини початкових, цільових, а також проміжних станів.

Множина можливих початкових станів при реалізації управлінського рішення задається набором фактів $\{f_0\} \subset F$. Ці факти визначають можливі проблемні ситуації при управлінні, представлені множиною аномальних станів ОУ.

Множина фактів $\{f_{aim}\} \subset F$ щодо досягнення цільового стану об'єкту управління відображає набір допустимих станів ОУ, досягнення яких свідчить про успішне завершення управлінського рішення.

Набір фактів $\{f_j\} \subset F$ щодо проміжних станів об'єкту управління дає можливість шляхом виводу на основі темпоральних знань сформувати можливі траєкторії реалізації управлінського рішення.

Слід зазначити, що згідно виразу (2) множина всіх фактів f_j є частково упорядкованою. Дійсно, факти лінійно упорядковані за часом τ_j виникнення станів лише у випадку, якщо вони належать до однієї реалізації управлінського рішення. Відношення для фактів з різних варіантів реалізації УР формуються лише у випадку співпадіння фрагментів альтернативних послідовностей управляючих дій (послідовностей станів ОУ). Більшість пар фактів, що належать до різних альтернативних послідовностей, не матимуть темпоральних відношень і тому залежності між ними не можуть бути представлені у вигляді темпоральних знань.

Процедурний аспект темпоральних знань задається на основі темпоральних відношень для пар фактів. Вище було відмічено, що кожна пара фактів в рамках

одного варіанту реалізації управлінського рішення пов'язана темпоральним відношенням. Дійсно, незалежно від послідовного чи паралельного виконання управляючих дій під час реалізації управлінського рішення стани на початок та на завершення кожної такої дії упорядковані в часі. Між ними можуть бути відсутніми проміжні стани ОУ у випадку послідовного виконання управляючих дій. Також можуть існувати проміжні стани ОУ, які виникли внаслідок початку або завершення паралельних дій, зовнішніх впливів, тощо. Перший і другий випадок відрізняється типом темпорального відношення, яке реалізується через темпоральну операцію.

Таким чином, кожна пара фактів f_j та f_m, що пов'язані темпоральним відношенням, задає темпоральне правило. Останнє є елементом представлення знань щодо послідовності виконання управляючих дій при реалізації управлінського рішення. Перший факт f_j виступає в якості антецеденту правила, істинність якого є умовою виконання цього елементу знань. Другий факт f_m є консеквентом правила, який визначає результати його виконання. Тобто реалізація правила свідчить про істинність елементарних фактів, що входять до складу консеквенту f_m, у момент часу τ_m. В рамках темпоральної моделі управлінського рішення [5] істинність консеквенту свідчить про успішне та своєчасне виконання відповідної управляючої дії. Реалізація такої дії доповнює базу істинних фактів щодо станів об'єкту управління. У випадку, якщо поточний стан ОУ ще не був відображений при реалізації управлінських рішень у минулому, то на основі відомих темпоральних знань може бути виконана перевірка аномальності цього стану, тобто вирішена задача виявлення проблемної ситуації. В цілому темпоральне правило як базовий елемент представлення темпоральних знань задається на основі відношення у часі:

$$f_j \overset{o}{\rightarrow} f_m \ \ |\tau_m > \tau_j, \forall j \forall m \, \exists i: \varphi_{j,i} \equiv \varphi_{m,i}. \qquad (3)$$

де o – темпоральний оператор, що визначає тип темпорального відношення між фактами.

Таким чином, темпоральне правило (3) визначає упорядкованість у часі в рамках однієї реалізації управлінського рішення для пари станів, що можуть бути реалізовані послідовно в часі, через проміжні стани, за апріорно визначених умов, тощо.

В цілому вирази (1) – (3) задають послідовність виконання управляючих дій у складі управлінського рішення. Дана послідовність може бути представлена з різним ступенем деталізації з урахування поточного рівня організаційної структури підприємства, на якому розглядається реалізація управлінського рішення.

Для побудови такого представлення необхідно сформувати ієрархію фактів у відповідності до ієрархічної структури підприємства з урахуванням поточних задач, що вирішуються шляхом виконання управлінського рішення. Для побудови ієрархії на основі множини фактів пропонується використати набір $\{h\}$, що, зокрема, містить логічні операції кон'юнкції та диз'юнкції для пар загальних фактів.

Реалізація цих операцій для розглянутих фактів має деякі особливості, що пов'язані як із темпоральним аспектом знань, так і з представленням організаційної ієрахії. Для представлення підрозділів організації пропонується використати відому концепцію артефактів, як інформаційних об'єктів з визначеними властивостями. Тоді результатом кон'юнкції для пари загальних фактів буде такий факт, який містить спільні елементарні факти у складі загальних фактів. Наведена інтерпретація кон'юнкції базується на представлених виразами (1) та (2) структурних особливостях загального та елементарного фактів. Тобто використання операції кон'юнкції дає можливість врахувати лише ті елементарні факти, що є спільними для декількох артефактів. Диз'юнкція фактів дає можливість поєднати потрібні властивості артефактів із спільної групи. Наприклад, представити у вигляді єдиного факту набуття певних властивостей всіма співробітниками підрозділу.

Визначення артефактів, відношень та операцій між ними дає можливість представити модель узагальненого представлення темпоральних знань у такому вигляді:

$$M = \{F, \{o\}, \{h\} : \forall f_j \neq f_{aim} \exists \, o: f_j \overset{o}{\rightarrow} f_m\}. \qquad (4)$$

Наведена модель дає можливість використати темпоральні знання для формування послідовності управляючих дій у часі на заданому рівні узагальнення.

Висновки. Запропоновано модель узагальненого представлення темпоральних знань, що використовуються для підтримки управлінських рішень. Модель містить у собі множину узагальнених фактів, а також набір операторів та операцій, що визначають відношення між цими фактами. Кожен факт відображає стан об'єкту управління, що виникає в результаті виконання однієї управляючої дії у визначений момент часу. Узагальнений факт являє собою конюнкцію елементарних фактів, кожен з яких задає значення певної властивості об'єкту управління. Відношення між фактами визначають їх послідовність у часі, а також їх відповідність ієрархічному рівню на об'єкті управління. Послідовність у часі задається за допомогою темпоральних операторів. Рівень деталізації або узагальнення у відповідності до ієрархічного рівня опису стану об'єкту управління задається логічними операціями. Практичне застосування запропонованої моделі дає можливість побудувати темпоральну базу знань, яка задає ймовірні послідовності управляючих дій або переходів між станами об'єкту управління, що дозволяє на основі ймовірнісного виводу сформувати можливі управлінські рішення при виникненні аномальних станів об'єкту управління.

Додаткові можливості використання запропонованого опису темпоральних знань пов'язані з побудовою інформаційно-довідкових систем та систем на основі прецедентів, які, на відміну від існуючих формують для користувача не лише декларативні, а й процедурні знання.

Список літератури

1. Frank Harrison E., Monique A. The essence of management decision. *Management Decision*. 2000. Vol. 38, issue 7. P. 462–470.
2. Смирнов Э.А. *Управленческие решения*. Москва: Инфра-М, 2001. 264 с.
3. Chala O. Method for detecting anomalous states of a control object in information systems based on the analysis of temporal data and knowledge. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2018. Vol. 6. P. 28–35.
4. Левикін В. М, Чала О. В. Підтримка прийняття рішень в інформаціно-управляючих системах з використанням темпоральної бази знань. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Том 2. № 4. С. 101–107.
5. Левикін В. М, Чала О.В. Метод підтримки управлінських рішень в умовах невизначеності на основі темпоральних знань. *Біоніка інтелекту*. 2018. № 2 (91). С. 54–59.
6. Kalynychenko O., Chaly S., Bodyanskiy Y., Golian V., Golian N. Implementation of Search Mechanism for Implicit Dependences in Process Mining. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2013 IEEE 7th International Conference*. Volume 1. P. 138–14.
7. Chalyi S., Leshchynskyi V., Leshchynska I. Method of forming recommendations using temporal constraints in a situation of cyclic cold start of the recommender system. *EUREKA: Physics and Engineering*. Vol. 4. P. 34–40.
8. Domingos P. Lowd D., Kok S., Poon H., Richardson M., Singla P. Just Add Weights: Markov Logic for the Semantic Web. *International Workshop on Uncertainty Reasoning for the Semantic Web*. 2006. P. 1–25.
9. Domingos P. Learning, logic, and probability: A unified view. *Proceedings of the IBERAMIA 2006, SBIA 2006: Advances in Artificial Intelligence - IBERAMIA-SBIA 2006.* Brazil, 2006. URL: springer.com/chapter/10.1007/11874850_2 (accessed: 18.05.2020).
10. Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. Моделювання пояснень щодо рекомендованого переліку об'єктів з урахуванням темпорального аспекту вибору користувача. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. Том 6 № 58. С. 97–101.
11. Чалий С. Ф., Лещинський В. О., Лещинська І. О. Доповнення вхідних даних рекомендаційної системи в ситуації циклічного холодного старту з використанням темпоральних обмежень типу «NEXT». *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. Вип. 4(56). С. 105–109.
12. Levykin V., Chala O. Development of a method of probabilistic inference of sequences of business process activities to support business process management. *Eastern-European Journal of Eenterprise Technologies*. 2018. № 5/3(95). P. 16–24.
13. Levykin V., Chala O. Development of information technology to support management decisions using the probabilistic inference in a temporal knowledge base. *Problems of information technologies*. 2018. №. 24. P. 35–44.

References (transliterated)

1. Frank Harrison E.., Monique A. The essence of management decision. *Management Decision*. 2000, vol. 38, issue 7, pp. 462–470.
2. Smirnov E. A. *Upravlencheskie resheniya* [Management decisions] Moscow: Ifra-M Publ., 2001. 264 p.
3. Chala O. Method for detecting anomalous states of a control object in information systems based on the analysis of temporal data and knowledge. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2018, vol. 6, pp. 28–35.
4. Levykin V. M, Chala O. V. Pidtrimka prijnyattya rishen v informacino-upravlyayuchih sistemah z vikoristannyam temporalnoyi bazi znan [Decision support in information and management systems using a temporal knowledge base]. *Suchasni informacijni sistemi* [Modern information systems], 2018, vol. 2, no. 4, pp. 101–107.
5. Levykin V., Chala O. Metod pidtrimki upravlinskih rishen v umovah neviznachenosti na osnovi temporalnih znan [Method of support of managerial decisions in conditions of uncertainty on the basis of temporal knowledge]. *Bionika intelektu* [Bionics of Intelligence]. 2018, no 2 (91), pp. 54–59.
6. Kalynychenko O., Chaly S., Bodyanskiy Y., Golian V., Golian N. Implementation of Search Mechanism for Implicit Dependences in Process Mining. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2013 IEEE 7th International Conference*. Vol. 1, pp. 138–14.
7. Chalyi S., Leshchynskyi V., Leshchynska I. Method of forming recommendations using temporal constraints in a situation of cyclic cold start of the recommender system. *EUREKA: Physics and Engineering*. Vol. 4, pp. 34–40.
8. Domingos P. Lowd D., Kok S., Poon H., Richardson M., Singla P. Just Add Weights: Markov Logic for the Semantic Web. *International Workshop on Uncertainty Reasoning for the Semantic Web*. 2006, pp. 1–25.
9. Domingos P. Learning, logic, and probability: A unified view. *Proceedings of the IBERAMIA 2006, SBIA 2006: Advances in Artificial Intelligence - IBERAMIA-SBIA 2006*. Brazil, 2006. URL: springer.com/chapter/10.1007/11874850_2 (accessed: 18.05.2020).
10. Chalyi S. F., Leshchynskyi V. O., Leshchynska I. O. Modelyuvannya poyasnen shodo rekomendovanogo pereliku ob'yektiv z urahuvannyam temporalnogo aspektu viboru koristuvacha [Modeling explanations for the recommended list of items based on the temporal dimension of user choice]. *Sistemi upravlinnya, navigaciyi ta zv'yazku* [Control, Navigation and Communication Systems]. 2019, vol. 6, no. 58. pp. 97–101.
11. Chalyi S. F., Leshchynskyi V. O., Leshchynska I. O. Доповнення вхідних даних рекомендаційної системи в ситуації циклічного холодного старту з використанням темпоральних обмежень типу «NEXT». [Supplementing the input of the recommendation system in a cyclic cold start situation using temporal constraints of the "next" type].*Sistemi upravlinnya, navigaciyi ta zv'yazku* [Control, Navigation and Communication Systems]. 2019, vol. 4(56), pp. 105–109.
12. Levykin V., Chala O. Development of a method of probabilistic inference of sequences of business process activities to support business process management. *Eastern-European Journal of Eenterprise Technologies*. 2018, no. 5/3(95), pp. 16–24.
13. Levykin V., Chala O. Development of information technology to support management decisions using the probabilistic inference in a temporal knowledge base. *Problems of information technologies*. 2018, no. 24, pp. 35–44.

Надійшла (received) 22.05.2020

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

Чала Оксана Вікторівна – кандидат економічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інформаційних управляючих систем, м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8265-2480; e-mail: oksana.chala@nure.ua.

Чалая Оксана Викторовна – кандидат экономических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры информационных управляющих систем, г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8265-2480; e-mail: oksana.chala@nure.ua.

Chala Oksana – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Kharkiv National University of Radioelectronics, Associate Professor of the Department of Information Control Systems, Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8265-2480; e-mail: oksana.chala@nure.ua.

УДК 004.891.3 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.04**

С. Ф. ЧАЛИЙ, В. О. ЛЕЩИНСЬКИЙ, І. О. ЛЕЩИНСЬКА

МОДЕЛЬ ПОЯСНЕННЯ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ УЗГОДЖЕНОСТІ ЗНАНЬ

Предметом дослідження є процеси побудови пояснень щодо отриманих результатів в інтелектуальних інформаційних системах. Пояснення роблять прозорим процес створення результуючої рекомендації, формують умови для створення користувачем причинно-наслідкових зв'язків між результатом виводу та поточними задачами, для вирішення яких була використана інтелектуальна система. Мета полягає в розробці моделі пояснення в інтелектуальній системі з можливістю забезпечити узгоджене з результатами роботи такої системи витлумачення з урахуванням контекстно-орієнтованих вимог щодо потреб користувачів. Для досягнення поставленої мети вирішуються задачі визначення вимог до пояснення щодо результатів роботи інформаційної системи, та розробки моделі пояснення на базі принципів узгодження знань з тим, щоб отримати рекомендації на основі відповідності фактів, гіпотез, результатів. Показано, що при узгодженні інтересів користувача та можливостей інтелектуальної системи необхідно визначити деталізацію знань з урахуванням інтервалу актуальності даних та знань, а також фінансових та технічних та інших особливостей використання отриманих результатів. Запропоновано модель пояснення в інтелектуальній системі на базі узгодження знань та даних. Модель містить множини узгоджених фактів, гіпотез та результатів. Узгодження виконується для гіпотез, які є підмножинами інших гіпотез, на основі пояснень гіпотез через факти та інші гіпотези, а також на базі відповідності між собою отриманих результатів та гіпотез. Моделі дає можливість обмежити використання неявних та неточних знань в рамках виводу лише їх узгодженою підмножиною. У практичному плані використання моделі орієнтовно на побудову пояснень згідно ступеню абстракції, рівня деталізації опису предметної області, а також з урахуванням вибраного аспекту витлумачення отриманої рекомендації. В цілому формування пояснень на основі узгодження знань підвищує довіру користувачів та створює умови для ефективного використання отриманих рекомендацій.

Ключові слова: знання; узгодженість знань; інтелектуальна система; рекомендації; пояснення, вимоги до пояснення.

С. Ф. ЧАЛЫЙ, В. А. ЛЕЩИНСКИЙ, И. А. ЛЕЩИНСКАЯ

МОДЕЛЬ ОБЪЯСНЕНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ СОГЛАСОВАННОСТИ ЗНАНИЙ

Предметом исследования являются процессы построения объяснений полученных результатов в интеллектуальных информационных системах. Пояснения делают прозрачным процесс создания результирующей рекомендации, формируют условия для создания пользователем причинно-следственных связей между результатом вывода и текущими задачами, для решения которых была использована интеллектуальная система. Цель заключается в разработке модели объяснения в интеллектуальной системе с возможностью обеспечить согласованное с результатами работы такой системы толкование с учетом контекстно-ориентированных требований относительно потребностей пользователей. Для достижения поставленной цели решаются задачи определения требований к объяснению относительно результатов работы информационной системы, а также разработки модели объяснения на базе принципов согласования знаний с тем, чтобы получить рекомендации на основе соответствия фактов, гипотез, результатов. Показано, что при согласовании интересов пользователя и возможностей интеллектуальной системы необходимо провести детализацию знаний с учетом интервала актуальности данных и знаний, а также финансовых и технических и других особенностей использования полученных результатов. Предложена модель объяснения в интеллектуальной системе на базе согласования знаний и данных. Модель содержит множества согласованных фактов, гипотез и результатов. Согласование выполняется для гипотез, которые являются подмножествами других гипотез, на основе объяснений гипотез через факты и другие гипотезы, а также на базе соответствия между собой полученных результатов и гипотез. Модель дает возможность ограничить использование неявных и неточных знаний в рамках вывода только их согласованным подмножеством. В практическом плане использования модели ориентировочно на построение объяснений с учетом уровня абстракции, степени детализации описания предметной области, а также с учетом выбранного аспекта толкования полученной рекомендации. В целом формирование объяснений на основе согласования знаний повышает доверие пользователей и создает условия для эффективного использования полученных рекомендаций.

Ключевые слова: знания; согласованность знаний; интеллектуальная система; рекомендации; объяснения, требования к объяснению.

S. CHALYI, V. LESHCHYNSKYI, I. LESHCHYNSKA

EXPLANATION MODEL IN AN INTELLIGENT INFORMATION SYSTEM BASED ON THE CONCEPT OF KNOWLEDGE COHERENCE

The subject of the research is the processes of constructing explanations of the results obtained in intelligent information systems. Explanations make transparent the process of creating the resulting recommendation, create the conditions for the user to create causal links between the result of the conclusion and the current problems for which the intelligent system was used. The aim is to develop an explanation model in an intelligent system with the ability to provide a consistent interpretation with the results of such a system, taking into account context-oriented requirements for user needs. To achieve this goal, the tasks of defining the requirements for explanation of the results of the information system, as well as developing a model of explanation based on the principles of knowledge coordination in order to obtain recommendations based on the facts, hypotheses, results. It is shown that when coordinating the interests of the user and the capabilities of the intelligent system, it is necessary to detail the knowledge taking into account the range of relevance of data and knowledge, as well as financial and technical and other features of the results. A model of explanation in an intelligent system based on the coordination of knowledge and data is proposed. The model contains many agreed facts, hypotheses and results. Reconciliation is performed for hypotheses that are subsets of other hypotheses, based on explanations of hypotheses through facts and other hypotheses, as well as on the basis of the correspondence between the obtained results and hypotheses. The model makes it possible to limit the use of implicit and inaccurate knowledge in the output only to their agreed subset. In practical terms, the use of the model is focused on constructing explanations taking into account the level of abstraction, the degree of detail of the description of the subject area, as well as taking into account the selected aspect of interpretation of the received recommendation. In general, the formation of explanations based on the harmonization of knowledge increases user confidence and creates conditions for the effective use of the received recommendations.

Keywords: knowledge; coherence of knowledge; intelligent system; recommendations; explanations, requirements for explanations.

© С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський, І. О. Лещинська, 2020

Вступ. Інтелектуальні інформаційні системи орієнтовані на виявлення, структуризацію та використання знань при вирішенні неструктурованих та частково структурованих проблем. Важливість застосування пояснень в таких інформаційних системах пов'язана із тим, що вони використовують комбінацію явних та неявних знань, а також формальних підходів та евристик для отримання потрібного користувачеві результату. Формальні підходи використовують знання про предметну область, які можуть бути застарілими, неповними, тощо. Евристичні методи зазвичай базується на використанні неявних, отриманих з практики, знань і, відповідно, не завжди дають релевантний результат. Тому використані знання-орієнтовані підходи не завжди можуть дати точний результат та у загальному випадку не є «прозорими» для користувача такої системи. Тому пояснення, які роблять явним процес отримання результату в інтелектуальній інформаційній системі, підвищують довіру користувачів, а також ефективність використання цих результатів. Слід також зазначити, що у випадку невідповідності знань про предметну область, що були використані у інтелектуальній системі, пояснення дає можливість користувачеві не враховувати отриманий у процесів виводу результат.

Наприклад, пояснення в рекомендаційній системі може розкривати користувачеві відповідність між його потребами та рекомендованими товарами. В результаті в умовах широкого спектру товарів спрощується вибір потрібного об'єкту, значно скорочується час, що витрачає користувач на пошук товарів та послуг згідно зі своїми інтересами. При використанні пояснень підвищується задоволеність споживача та в подальшому збільшується кількість користувачів відповідної системи електронної комерції, підвищується ефективності її роботи.

В цілому пояснення забезпечують користувача інформацією та знаннями, що обґрунтовують результати виводу в інтелектуальній інформаційній системі. Пояснення має сформувати для користувача причинно-наслідкові зв'язки між рекомендацією інтелектуальної системи та його поточними задачами, для вирішення яких була використана дана система.

Таким чином, актуальною є проблема формалізації пояснень з урахуванням особливостей знань, які були використані в інтелектуальній інформаційній системі, що дає можливість підвищити довіру користувачів до отриманих результатів та, на цій базі, удосконалити процес функціонування системи в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Базові підходи до представлення пояснень в інтелектуальних системах базуються на описі витлумачень в експертних системах, а також системах з використанням прецедентів [1]. Використання знань для побудови пояснень розглядалось в роботі [2]. Автоматизація виявлення знань для побудови пояснень на прикладі рекомендаційних систем була досліджена в роботах [3–5]. Знання для пояснень виявляються на базі аналізу інформації від користувачів, наприклад рейтингів в рекомендаційних системах [3]. Також при формуванні знань використовується інформація про зміни стану предметної області в часі [4, 5]. Такі зміни відображаються за допомогою спеціалізованих правил [6, 7] з тим, щоб ці пояснення були переконливими для споживачів. В роботі [8] запропоновано будувати інтерфейс пояснення на базі виявлення типових потреб користувачів.

В цілому дані роботи приділяють увагу окремим аспектами представлення знань та інтерфейсу пояснення, без урахування узгодженості цих знань.

В роботах [9–11] було запропоновано базові принципи узгодженості знань для формування пояснення. Такий підхід дає можливість виділити підмножину знань, що будуть використані для побудови пояснення. Однак він не враховує ряд факторів, які пов'язані із вимогами до витлумачень [12, 13] та впливають на доступність та переконливість пояснення для користувача:

– представлення в прозорій формі механізму функціонування інтелектуальної системи:

– відображення зв'язку пояснення із потребами користувача:

– врахування змін потреб користувача.

Зазначені недоліки свідчать про важливість побудови інтегральної моделі пояснення на принципах узгодження знань з урахуванням статичних та динамічних характеристик роботи інтелектуальної системи, а також вимог та потреб користувача такої системи.

Метою цієї статті є розробка моделі пояснення в інтелектуальній системі, яка б забезпечувала узгоджене з результатами роботи такої системи витлумачення з урахуванням контексту потреб користувачів.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі:

– структуризація вимог до пояснення щодо результатів роботи інтелектуальної інформаційної системи;

– розробка моделі пояснення на основі принципів узгодження знань.

Модель пояснення в інтелектуальній системі на основі концепції узгодження знань.

Визначимо базові вимоги до пояснень в аспекті «прозорої» внутрішньої структури інтелектуальної інформаційної системи.

По-перше, пояснення має коректно відображати порядок функціонування інтелектуальної системи, без пропуску ключових дій та процедур. Згідно даної вимоги, при формуванні пояснень необхідно враховувати всі знання, які були використані інтелектуальною системою для отримання результату. Пропуск підмножини кроків (та відповідної підмножини знань) знижує довіру користувача до такої системи. У випадку невизначеності щодо знань, що використовуються, при побудові пояснень доцільно використовувати ймовірнісні підходи. Визначення ймовірностей для окремих процедур або знань про опис предметної області може бути виконано згідно підходів, запропонованих в роботах [6, 7].

По-друге, форма представлення пояснень має бути зрозумілою для користувача інтелектуальної

системи. Зрозумілість пояснення залежить від контексту виводу та пояснення в інтелектуальній системі, а також контексту використання цієї системи споживачем.

Явне представлення контексту роботи інтелектуальної системи визначається рівнем абстракції, деталізації, а також набором аспектів, згідно яких може бути представлена послідовність отримання результату.

Рівень абстракції визначається набором понять, які використовуються при побудові пояснення. Наприклад, пояснення в рекомендаційній системі може бути представлено на рівні характеристик вибраного предмету, з урахуванням рейтингів та покупок цього товару, тощо.

Рівень деталізації визначає об'єм пояснень та частку характеристик та деталей «за замовчуванням» при формуванні пояснення. Наприклад, при формуванні пояснень в рекомендаційній системі можуть бути враховані помісячні, щотижневі, щоденні зміни продажів вибраного товару або послуги.

Множина аспектів визначає «зрізи» роботи інтелектуальної системи. Так, пояснення може враховувати фінансовий, часовий, технічний та інші аспекти. При формуванні пояснення у фінансовому аспекті розглядається в першу чергу фінансовий виграш користувача у випадку використання отриманої від інтелектуальної системи рекомендації. Наприклад, фінансові переваги від вибору запропонованого рекомендаційною системою товару або послуги.

Пояснення у часовому аспекті враховує актуальність використання результату роботи інтелектуальної системи для вибраного періоду часу. Так, рішення-прототипи для системи на основі прецедентів можуть бути реалізуємими, але застарілими. Відповідно, такі рішення мають обмежений інтервал використання у часі.

Пояснення у технічному (біологічному, тощо) аспекті визначає переваги від використання запропонованих інтелектуальною системою пропозицій у визначеній предметній області. Так, пояснення щодо вибору пристрою в рекомендаційній системі може містити інформацію про його технічні переваги над конкуруючими товарами.

Представлення контексту використання результатів роботи інтелектуальної системи користувачем зазвичай використовує інформацію про цілі, переваги та обмеження користувача. Тому визначення контексту користувача є ітеративною процедурою і потребує зворотного зв'язку для покрокового уточнення пояснень.

По-третє, пояснення мають враховувати функціональність інтелектуальної системи в цілому, призначення об'єктів, з якими оперує така система, а також базові відношення між об'єктами у предметній області.

Набір функцій інтелектуальної системи визначає її поведінку, послідовність її роботи. Тому аналіз журналу подій системи з використанням знань про її функції дає можливість показати послідовність прийняття рішень і, тим самим, підвищити довіру користувача.

Знання, що використовуються для прийняття рішень в інтелектуальній системі, враховують призначення об'єктів, щодо яких виконується вивід. Такі знання дають можливість визначити рівні абстракції та деталізації у контексті виводу в інтелектуальній системі і підвищити точність пояснення.

Знання про відношення між об'єктами в предметній області визначають особливості застосування отриманих в інтелектуальній системі результатів. Відповідно, такі знання дають можливість деталізувати фінансовий, часовий, технічний та інші аспекти пояснення з метою визначити ключові для користувача характеристики отриманого рішення.

Для задоволення наведених вимог пропонується використати принципи [10] узгодження знань для пояснення. Концепція узгодження знань полягає у тому, що для реалізації виводу у предметній області необхідно використовувати не просто несуперечні з позицій логіки знання, а лише узгоджені факти, правила, гіпотези. Схему узгодження знань згідно представлених вимог наведено на рис. 1.



Рис. 2. Схема узгодження знань згідно вимог до пояснень

Фактично концепція узгодженості знань дає можливість використати для отримання результату в інтелектуальній системі набір гіпотез зі схожою семантикою. Наприклад, при формуванні пояснення для рекомендаційної системи узгодження означає, що

форма представлення пояснень з одного боку має відповідати інтересам користувача, а з іншого – відображати механізм формування рекомендацій. При узгодженні інтересів користувача та можливостей системи необхідно задати деталізацію з визначенням інтервалу актуальних знань, фінансових та технічних характеристик рекомендованого об'єкту, а також контексту його використання. Послідовність подання інформації у поясненні може бути визначена з урахуванням послідовності побудови рекомендацій.

Модель пояснення, згідно представленої на рис. 1 схеми, має реалізувати принципи узгодження знань по технічному, часовому, фінансовому та іншим аспектам пояснення з урахуванням ступеню абстракції та ступеню деталізації.

В моделі враховуються такі характеристики узгоджених знань:

– відповідність вхідних даних та знань щодо поточних властивостей предметної області;

– відповідність гіпотез;

– прийнятність результатів.

При відборі в вхідних фактів для виводу результатів необхідно враховувати їх узгодженість, в сенсі відповідності поставленій задачі. Узгодженість знань будемо позначати знаком «~». Ідея підходу полягає в тому, щоб визначити базові факти й гіпотези та узгодити з ними всі інші знання, що необхідні для вирішення поточної задачі. Узгодженість для пар фактів s_i,s_j , що задають статичний опис предметної області, має вигляд:

$$(s_i \sim s_j) \equiv (s_i \sim s_j),\ s_i, s_j \in S. \qquad (1)$$

Згідно (1), для формування підмножини узгоджених вхідних фактів достатньо їх попарної узгодженості. Таке визначення дає можливість об'єднувати узгоджені факти з різних аспектів контексту функціонування та використання результатів роботи інтелектуальної системи, а також змінювати рівень деталізації або використовувати додаткові абстракції.

Якщо гіпотеза g_m виступає в якості пояснення для факту s_i, тобто $g_m = \text{expl}(s_i)$, то узгоджена гіпотеза g_n може виступати в якості пояснення для узгодженого факту s_j:

$$\begin{gathered}(g_m = \text{expl}(s_i)) \wedge (s_i \sim s_j) \Rightarrow \\ \Rightarrow \exists\ g_n : (g_m \sim g_n) \wedge \left(g_n = \text{expl}(s_i)\right).\end{gathered} \qquad (2)$$

Гіпотези g_m,g_n є узгодженими в тому випадку, якщо одна гіпотеза є частиною іншої:

$$g_m \sim g_n \Rightarrow (g_n \subset g_m) \vee (g_m \subset g_n),\ g_m, g_n \in G. \qquad (3)$$

Множина фактів S_i та гіпотез G_n узгоджується з іншою гіпотезою p, якщо остання є їх поясненням:

$$p = \text{expl}(S_i, G_n) \Rightarrow p \sim (S_i, G_n). \qquad (4)$$

Прийнятність отриманого результату r_k при вирішенні задачі залежить від узгодженості цього результату із множиною інших результатів R, що були отримані при вирішенні цієї ж задачі. Тобто всі результати із множини R мають бути узгодженими між собою та з гіпотезами, що були використані при їх отриманні:

$$\forall (r_k, r_l \in R)(r_k \sim r_l), \exists (g_m \sim r_k)\ . \qquad (5)$$

Модель пояснення E з узгодженням знань має вигляд:

$$\begin{gathered}E = \{S, G, R: \\ \forall s_i \in S\ \exists s_j : \left(s_i \sim s_j\right), \forall g_m \in G\ \exists g_n : (g_m \sim g_n) \\ \forall r_k \in R\ \exists r_l, g_m : (r_k \sim r_l),\ (g_m \sim r_k)\}.\end{gathered} \qquad (6)$$

Згідно (6) множина фактів, гіпотез, результатів має бути обмежена лише узгодженими елементами.

Висновки. Запропоновано модель пояснення в інтелектуальній системі на базі узгодження знань та даних. Модель містить факти, гіпотези та результати, які узгоджені між собою на основі поглинання гіпотез, пояснень гіпотез через факти та інші гіпотези, а також відповідності між собою отриманих результатів. Така структура моделі дає можливість обмежити використання неявних та неточних знань лише їх узгодженою підмножиною. Практичне використання моделі дозволяє будувати пояснення з урахуванням ступеню абстракції, рівня деталізації опису предметної області, а також вибраного аспекту розгляду отриманої рекомендації від інтелектуальної системи.

Список літератури

1. Cunningham P., Doyle D., Loughrey J. An evaluation of the usefulness of case-based reasoning explanation. *Proceedings of the International Conference on Case-Based Reasoning. ICCBR 2003.* Trondheim, Springer, 2003. P. 122–130.
2. Swartout W., Moore J. Explanation in Second Generation Expert Systems. *Second Generation Expert Systems*. 1993. P. 543–585.
3. Cleger S., Fernndez-Luna J., F Huete J. Learning from explanations in recommender systems. *Information Sciences*. 2014. Vol. 287. P. 90–108.
4. Chalyi S., Leshchynskyi V., Leshchynska I. Method of forming recommendations using temporal constraints in a situation of cyclic cold start of the recommender system. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. Vol. 4. P. 34–40.
5. Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. Моделювання пояснень щодо рекомендованого переліку об'єктів з урахуванням темпорального аспекту вибору користувача. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. Том 6 № 58. С. 97–101.
6. Levykin V., Chala O. Method of determining weights of temporal rules in markov logic network for building knowledge base in information control system. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2018. Vol. 5. P. 3–10.
7. Levykin V., Chala O. Development of a method for the probabilistic inference of sequences of a business process activities to support the business process management. *Eastern-European Journal of Eenterprise Technologies*. 2018. Vol. 5/3(95). P. 16–24.
8. Daher J, Brun A., Boyer A. A. A review on explanations in recommender systems. *Technical Report*. LORIA Université de Lorraine, 2017. 26 p. URL: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01836639/document (accessed: 18.05.2020).
9. Thagard P., Verbeurgt K. Coherence as constraint satisfaction. *Cognitive Science*. 1998. Vol. 22. P. 1–24.
10. Thagard P. Coherence, truth, and the development of scientific knowledge. *Philosophy of Science*. 2007. Vol. 74. P. 28–47.
11. Thagard P. Causal inference in legal decision making: Explanatory coherence vs. Bayesian networks. *Applied Artificial Intelligence*. 2004. Vol. 18. P. 231–249.
12. Tintarev N., Masthoff J. A survey of explanations in recommender systems. *3rd international workshop on web personalisation,*

recommender systems and intelligent user interfaces (WPRSIUI'07). 2007. P. 801–810. URL: https://abdn.pure.elsevier.com/en/publications/a-survey-of-explanations-in-recommender-systems (accessed: 17.05.2020).
13. Tintarev N., Masthoff J. Designing and Evaluating Explanations for Recommender Systems. *Recommender Systems Handbook*. 2010. P. 479–510.

References (transliterated)

1. Cunningham P., Doyle D., Loughrey J. An evaluation of the usefulness of case-based reasoning explanation. *Proceedings of the International Conference on Case-Based Reasoning. ICCBR 2003*. Trondheim, Springer, 2003, pp. 122–130.
2. Swartout W., Moore J. Explanation in Second Generation Expert Systems. *Second Generation Expert Systems*. 1993, pp. 543–585.
3. Cleger S., Fernбndez-Luna J., F Huete J. Learning from explanations in recommender systems. *Information Sciences*. 2014, vol. 287, pp. 90–108.
4. Chalyi S., Leshchynskyi V., Leshchynska I. Method of forming recommendations using temporal constraints in a situation of cyclic cold start of the recommender system. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019, vol. 4, pp. 34–40.
5. Chalyi S. F., Leshchynskyi V. O., Leshchynska I. O. Modelyuvannya poyasnen shodo rekomendovanogo pereliku ob'yektiv z urahuvannyam temporalnogo aspektu viboru koristuvacha [Modeling explanations for the recommended list of items based on the temporal dimension of user choice]. *Sistemi upravlinnya, navigaciyi ta zv'yazku* [Control, Navigation and Communication Systems]. 2019, vol. 6, no. 58, pp. 97–101.
6. Levykin V., Chala O. Method of determining weights of temporal rules in markov logic network for building knowledge base in information control system. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2018, vol. 5, pp. 3–10.
7. Levykin V., Chala O. Development of a method for the probabilistic inference of sequences of a business process activities to support the business process management. *Eastern-European Journal of Eenterprise Technologies*. 2018, vol. 5/3(95), pp. 16–24.
8. Daher J, Brun A., Boyer A. A. A review on explanations in recommender systems. *Technical Report*. LORIA Université de Lorraine, 2017. 26 p. URL: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01836639/document (accessed: 18.05.2020).
9. Thagard P., Verbeurgt K. Coherence as constraint satisfaction. *Cognitive Science*. 1998, vol. 22, pp. 1–24.
10. Thagard P. Coherence, truth, and the development of scientific knowledge. *Philosophy of Science*. 2007, vol, 74, pp. 28–47.
11. Thagard P. Causal inference in legal decision making: Explanatory coherence vs. Bayesian networks. *Applied Artificial Intelligence*. 2004, vol. 18, pp. 231–249.
12. Tintarev N., Masthoff J. A survey of explanations in recommender systems. *3rd international workshop on web personalisation, recommender systems and intelligent user interfaces (WPRSIUI'07)*. 2007, pp. 801–810. URL: https://abdn.pure.elsevier.com/en/publications/a-survey-of-explanations-in-recommender-systems (accessed: 17.05.2020).
13. Tintarev N., Masthoff J. Designing and Evaluating Explanations for Recommender Systems. *Recommender Systems Handbook*. 2010, pp. 479–510.

Надійшла (received) 21.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чалий Сергій Федорович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інформаційних управляючих систем, м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9982-9091; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua

Лещинський Володимир Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8690-5702; e-mail: volodymyr.leshchynskyi@nure.ua

Лещинська Ірина Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8737-4595; e–mail: iryna.leshchynska@nure.ua

Чалий Сергій Федорович – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры информационных управляющих систем, г. Харков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9982-9091; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua

Лещинский Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры програмной инженерии, г. Харков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8690-5702; e-mail: volodymyr.leshchynskyi@nure.ua

Лещинская Ирина Александровна – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры програмной инженерии, г. Харков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8737-4595; e–mail: iryna.leshchynska@nure.ua

Chalyi Serhii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of the Department of Information Control Systems, Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9982-9091; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua

Leshchynskyi Volodymyr Oleksandrovich – PhD, Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8690-5702; e-mail: volodymyr.leshchynskyi@nure.ua

Leshchynska Irina Oleksandrivna – PhD, Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8737-4595; e–mail: iryna.leshchynska@nure.ua

УДК 004.932.2:004.93'1 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.05**

А. Р. КОВТУНЕНКО, О. В. ЯКОВЛЕВА, В. А. ЛЮБЧЕНКО, О. В. ЯНГОЛЕНКО

ДОСЛІДЖЕННЯ СУМІСНОГО ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОРФОЛОГІЇ ТА ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ РОЗПІЗНАВАННЯ ЦІННИКІВ

Робота присвячена вирішенню задачі розпізнавання зображень, що містять інформацію символьного типу, штрих коди, логотипи, або інші знаки. Прикладом таких зображень є цінники в торговельних центрах, флаєра, запрошення, білети на різні заходи. Інформація на таких зображеннях має різний тип і її розпізнавання потребує відмінних підходів. В роботі розглядалось питання розпізнавання цінників в торговельних мережах. Для розпізнавання елементів зображення суттєву роль відіграє точність їх детектування. Було досліджено поєднання класичних методів аналізу зображень та нейромережевого підходу. Особливу увагу було приділено дослідженню у порівняльному аспекті детектування об'єктів методами морфології та шляхом обробки згортковою нейронною мережею. Дослідження показали, що морфологія дає значно нижчу якість детектування ніж нейронна мережа, але у декілька разів перевищує її у швидкодії. Оскільки швидкодія має велике значення для реалізації алгоритмів на мобільних пристроях, до морфології була додана обробка додатковими фільтрами та нормалізація геометричних спотворень, що суттєво поліпшило точність детектування та подальшого розпізнавання. За результатами досліджень питань детектування та розпізнавання штрих коду і символьної інформації, що присутня на цінниках, зроблено висновки щодо обрання підходів та технологій для вирішення цих задач, розроблено алгоритм та на його основі застосунок для розпізнавання цінників різних торговельних мереж. Також була розроблена мобільна версія застосунку. Алгоритм побудовано таким чином, що першим кроком є детектування опорного елементу, наприклад, штрих коду, далі відносно опорного елементу відбувається детектування інших елементів цінника. Штрих код детектується за допомогою математичної морфології та методів математичної статистики, яка використовується для підвищення точності алгоритму, або за допомогою згорткових нейронних мереж. Для детектування ціни та назви товару використовується згорткова нейронна мережа CRAFT, що вміє обробляти зображеннями низької якості. Знайдені назва та ціна нормалізуються для усунення геометричних спотворень та передаються для розпізнавання бібліотеці Tesseract. Ця бібліотека працює з багатьма мовами та знаходиться у відкритому доступі. Застосунок для розпізнавання цінників був створений мовою C++ з використанням бібліотек OpenCV, ZXing, Libtorch, Tesseract.

Ключові слова: розпізнавання зображень, детектування об'єктів, морфологія, нормалізація геометричних перетворень, згорткова нейронна мережа, рекурентна нейронна мережа, навчання нейронної мережі, торгівельна мережа, цінники, штрих код, програмний застосунок.

А. Р. КОВТУНЕНКО, Е. В. ЯКОВЛЕВА, В. А. ЛЮБЧЕНКО, О. В. ЯНГОЛЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОРФОЛОГИИ И СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ЦЕННИКОВ

Работа посвящена решению задачи распознавания изображений, содержащих информацию символьного типа, штрих коды, логотипы и другие знаки. Примером таких изображений являются ценники в торговых центрах, флаера, приглашения, билеты на различные мероприятия. Информация на таких изображениях разнотипная и ее распознавание требует отличных подходов. В работе рассматривался вопрос распознавания ценников в торговых сетях. Для распознавания элементов изображения существенную роль играет точность их детектирования. Было исследовано сочетание классических методов анализа изображений и нейросетевого подхода. Особое внимание было уделено исследованию в сравнительном аспекте детектирования объектов методами морфологии и путем обработки сверточной нейронной сетью. Исследования показали, что морфология дает значительно более низкое качество детектирования, чем нейронная сеть, но в несколько раз превышает ее в быстродействии. Поскольку быстродействие имеет большое значение для реализации алгоритмов на мобильных устройствах, к морфологии была добавлена постобработка дополнительными фильтрами и нормализация геометрических искажений, что существенно улучшило точность детектирования и последующего распознавания. По результатам исследований детектирования и распознавания штрих кода и символьной информации, присутствующих на ценниках, сделаны выводы об избрании подходов и технологий для решения этих задач, разработан алгоритм и на его основе приложение для распознавания ценников различных торговых сетей. Также была разработана мобильная версия приложения. Алгоритм построен таким образом, что первым шагом происходит детектирование опорного элемента, например, штрих кода, далее относительно опорного элемента детектируются другие элементы ценника. Штрих код детектируется с помощью математической морфологии и методов математической статистики, используемых для повышения точности алгоритма, или с помощью сверточных нейронных сетей. Для детектирования цены и названия товара используются сверточная нейронная сеть CRAFT, которая умеет обрабатывать изображения низкого качества. Найденные название и цена нормализуются для устранения геометрических искажений и передаются для распознавания библиотеке Tesseract. Данная библиотека работает со многими языками и находится в открытом доступе. Приложение для распознавания ценников было создано на языке C ++ с использованием библиотек OpenCV, ZXing, Libtorch, Tesseract.

Ключевые слова: распознавание изображений, детектирование объектов, морфология, нормализация геометрических преобразований, сверточная нейронная сеть, рекуррентная нейронная сеть, обучение нейронной сети, торговая сеть, ценники, штрих код, программное приложение.

A. R. KOVTUNENKO, O. V. YAKOVLEVA, V. A. LIUBCHENKO, O. V. YANHOLENKO

RESEARCH OF THE JOINT USE OF MATHEMATICAL MORPHOLOGY AND CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR THE SOLUTION OF THE PRICE TAG RECOGNITION PROBLEM

The work is devoted to solving the problem of recognizing images containing symbolic type information, barcodes, logos and other signs. Example of such images are price tags in shopping centers, flyers, invitations, tickets to various events. The information on such images is of a different type and its recognition requires various approaches. The work addressed the recognition of price tags in retail chains. The accuracy of object detection has a significant role for their recognition. A significant role for recognition of image elements has the accuracy of their detection. The combination of classical methods of image analysis and the neural network approach were investigated. Particular attention was paid to the study in the comparative aspect of the object detection by morphological method and by processing a convolutional neural network. Studies have shown that morphology yields a significantly lower detection quality than a neural network, but is several times faster than it. Since speed has a great importance for the implementation of algorithms on mobile devices, post-processing with additional filters and normalization of geometric distortions were added to the morphology, that significantly improved the accuracy of detection and subsequent recognition. Based on the research results of detection and recognition of barcodes and symbolic information presented on price tags, conclusions are drawn about choosing approaches and technologies for solving these problems, an algorithm has been developed and, on its basis, an application for recognizing price tags of various retail chains. A mobile version of the application has been developed

© А. Р. Ковтуненко, О. В. Яковлева, В. А. Любченко, О. В. Янголенко, 2020

also. The algorithm is constructed in such a way that the first step is the detection of the supporting element, for example, a barcode, then other price tag elements are detected relative to this supporting element. The barcode is detected with the methods based on mathematical morphology and mathematical statistics which were used to improve the accuracy of the algorithm, or convolutional neural networks. To detect prices and product names, the convolutional neural network CRAFT is exploited, which can process low-quality images. The found name and price are normalized to eliminate geometric distortions and transferred to the Tesseract library for recognition. This library works with many languages and is in the public access. The price tag recognition application was created in C ++ using the OpenCV, ZXing, Libtorch, Tesseract libraries.

Keywords: image recognition, object detection, morphology, normalization of geometric transformations, convolutional neural network, recurrent neural networks, neural network training, retail chains, price tags, barcode, software application

Вступ. В останнє десятиріччя в вирішенні багатьох задач комп'ютерного зору досягнуті суттєві успіхи, особливо, в області класифікації, детектування, сегментації, розпізнавання об'єктів. Особливі успіхи пов'язані із стрімким розвитком нейронних мереж, але, як і раніше, велика кількість задач потребують використання класичних методів. Незважаючи на успіхи, існує потреба у подальших дослідженнях питань детектування та розпізнавання об'єктів на зображеннях, наприклад, для вирішення конкретних задач, де на одному зображенні присутні об'єкти принципово відмінного типу (текст, штрих код, логотип та ін.) та вимагається робота в режимі реального часу. Такі задачі потребують поєднання багатьох підходів обробки та аналізу зорової інформації. Робота присвячена вирішенню задачі розпізнавання цінників у торговельних мережах, а саме, детектуванню на них штрих коду, ціна та назви товару.

Аналіз проблеми та обґрунтування теми дослідження полягає у наступному:

- відсутня єдина база цін товарів різних торговельних мереж;
- складність автоматичного контролю коректності цін на цінниках товарів у торгівельному залі, або порівняння ціни однакових товарів у різних торговельних мережах;
- відсутність єдиного стандарту цінника (див. рис. 1);
- складність детектування та розпізнавання об'єктів на зображенні за наявністю значних перешкод.



Рис. 1. Приклади цінників різних форматів

Постановка задачі досліджень. Метою даної роботи є дослідження сумісного використання математичної морфології та згорткових нейронних мереж для вирішення задачі розпізнавання цінників у торговельних мережах.

Для досягнення мети необхідно було розглянути такі питання:

- розробка підходу для розпізнавання цінників на зображенні;
- детектування штрих коду (мат. морфологія, нейронна мережа);
- підготовка даних для навчання мережі для пошуку штрих кодів;
- навчання нейронної мережі для пошуку штрих кодів;
- порівняння результатів пошуку штрих кодів методами математичної морфології та нейронною мережею;
- розпізнавання штрих коду;
- пошук та розпізнавання текстової інформації на цінніку.

На основі результатів досліджень розробити застосунок для автоматичного зчитування інформації про ціну, назву, штрих код товару з фото, яке завантажує користувач, за рахунок знаходження певних об'єктів, їх вилучення та розпізнавання.

Вимоги до завантажених зображень:

- система повинна працювати з зображеннями форматів: jpg, png, bmp, роздільна здатність яких не нижча 300 dpi;
- зображення цінників повинні бути у фокусі та займати не менше 15% зображення;
- на одному зображенні повинні бути лише однакові типи цінників (див. рис. 2).



Рис. 2. Приклад завантаженого зображення

Дослідження питання детектування штрих коду методом математичної морфології. Математична морфологія представляє собою набір алгоритмів обробки зображень, в основі яких лежить операція згортки із попередньо визначеними структурними елементами – шаблонами [1]. Структурний елемент – це матриця, яка складається з елементів [0; 1], і визначає піксель, який обробляється, та як на нього будуть впливати пікселі з зображення по сусідству. Для виконання морфологічних операцій структурний елемент проходить ковзним вікном по усьому зображенню. В основі математичної морфології знаходяться операції ерозія (erosion) та розширення (dilation).

Ерозія – операція математичної морфології, при якій піксель у вихідному зображенні, що визначається структурним елементом, приймає значення 1 лише у

тому випадку, якщо кожен одиничний піксель структурного елементу співпаде з одиничним пікселем бінарного зображення, інакше приймає значення 0. В результаті застосування операції ерозії всі об'єкти, менші ніж структурний елемент, стираються, об'єкти, з'єднані тонкими лініями стають роз'єднаними і розміри всіх об'єктів зменшуються. Операція ерозії корисна для видалення малих об'єктів і різних шумів, але у цій операції є недолік – усі об'єкти, які залишилися, зменшуються в розмірі. Цей ефект можна прибрати, якщо після операції ерозії застосувати операцію розширення з тим же структурним елементом. Така операція часто повторювалася, тому її винесли у окрему операцію – відкриття. Відкриття фільтрує всі об'єкти, менші ніж структурний елемент, але при цьому допомагає уникнути сильного зменшення їх розміру. Ця операція ідеально підходить для видалення ліній, товщина яких менше, ніж діаметр структурного елементу. Також важливо пам'ятати, що після цієї операції контури об'єктів стають більш гладкими.

Розширення – операція математичної морфології, при якій піксель у вихідному зображенні, що визначається структурним елементом, приймає значення 1 лише у тому випадку, якщо хоча б один одиничний піксель структурного елементу співпаде з одиничним пікселем бінарного зображення, інакше приймає значення 0. Якщо до зображення застосувати спочатку операцію розширення, то вона заповнить області з малими дірками та щілинами, але це призведе до збільшення контурів об'єкта. Уникнути цього збільшення дозволяє операція ерозії, виконана відразу після операції розширення з тим же структурним елементом. Така комбінація базових операцій виділена у окрему операцію – закриття.

Одним з типових застосувань математичної морфології є виділення на бінарному зображенні компонент, у яких форма і розміри задовольняють заданим обмеженням. У таких завданнях можлива побудова структурного елементу, який після застосування до бінарного зображення, збільшить необхідну область. Оскільки штрих код складається з вертикальних ліній з проміжками, для його знаходження можна застосувати морфологічну операцію закриття. Після її застосування вертикальні лінії у штрих коді об'єднуються і утворюють прямокутник. Далі, для усунення можливого злиття з іншими елементами поряд, необхідно застосувати операції ерозії та виконати аналіз отриманих контурів по відношенню сторін для відкидання зайвих елементів. Значення розмірів структурних елементів було отримано експериментальним шляхом, вони залежать від діапазону розбігу розмірів штрих кодів на завантажених зображеннях. Тому при практичній реалізації запропонованого підходу треба для завантажених зображень встановити обмеження на частину, що займає цінник, у розмірі 15%, зображення цінників повинні бути у фокусі, на одному зображенні можуть бути лише однакові типи цінників.

Для додаткової фільтрації зайвих елементів, які за відношенням сторін мають задовільний результат, необхідно порахувати метрики математичного очікування та дисперсії частоти переходів у кожному рядку кожного виділеного регіону з бінарного зображення, але до морфологічних операцій. Експериментальним шляхом були виявлені такі норми: математичне очікування у діапазоні від 22 до 31, дисперсія у діапазоні від 5 до 9. Цими константами можна регулювати пороги точності детектування, бо на знімках, які зроблені камерою з малою роздільною здатністю, після бінаризації втрачається багато ліній самого штрих коду, але таким чином зростає частка помилково знайдених елементів.

Оскільки на зображенні штрих коди можуть знаходитися під невеликим нахилом, це впливає на результат подальшого розпізнавання. Тому в роботі пропонується ще крок нормалізації геометричних перетворень [2].

В результаті досліджень був розроблено алгоритм на основі операцій математичної морфології для детектування штрих коду, який складається із наступних кроків:

1. Бінаризувати зображення (див. рис.3) та провести фільтрацію медіанним фільтром.
2. Виконати морфологічні операції закриття та ерозії (див. рис. 4).
3. Отримати контури, провести фільтрацію (по відношенню сторін), апроксимувати контури у прямокутники (див. рис. 4).
4. Виконати додаткову фільтрацію по математичному очікуванню (див. рис. 5).
5. Провести нормалізацію геометричних перетворень отриманих прямокутників.



Рис. 3. Вхідне зображення (зліва) та бінаризоване (справа)

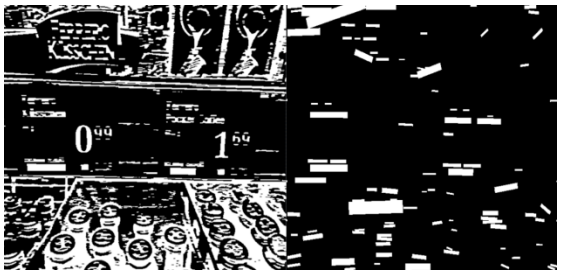


Рис. 4. Результати застосування морфології (зліва) та залиття контурів після неї (справа)

Дослідження питання детектування штрих коду за допомогою згорткових нейронних мереж. Нейромережевий підхід потрібує велику кількість даних для навчання. Для досліджень було створено датасет цінників з розміткою областей, де знаходилися штрих коди (див. рис. 6) [3]. Для розмітки

використовувався застосунок LabelMe [4], розмічені зображення було переведено у формат COCO [5], анотації зберігалися у одному JSON файлі.



Рис. 5. Результат фільтрації за допомогою математичного очікування



Рис. 6. Приклад зображень з датасету та їх розмітка

Ідея архітектури мережі належить Zharkov A., Zagaynov I. [6]. Вона проводить пошук за допомогою семантичної сегментації. Так як штрих коди не накладаються один на одного, то задачу екземплярної сегментації вирішувати було не потрібно. Виходом мережі є зображення, у якому пікселі приймають значення від 0 до 1 і показують розподіл ймовірності належності цього пікселя до штрих коду.

В оригінальній статті не було шарів для пакетної нормалізації [7], але виникала проблема перенавчання, тому в роботі було запропоновано додати шари пакетної нормалізації для підвищення стабільність нейронної мережі. Пакетна нормалізація нормалізує вихід попереднього шару активації шляхом віднімання середнього значення пакету та ділення на стандартне відхилення:

$$\mu_B = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} x_i,$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(x_i - \mu_B)^2,$$

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - \mu_B}{\sqrt{\sigma^2 + \varepsilon}},$$

$$y_i = \gamma\hat{x}_i + \beta,$$

де B – пакет з зображеннями;

m – кількість зображень у пакеті;

x_i – зображення з пакету B;

$\varepsilon > 0$ – скільки завгодно мале число, яке запобігає діленню на нуль;

γ,β – параметри нормалізації, які система буде вивчати.

Кінцева структура нейронної мережі наведена на рис. 7.

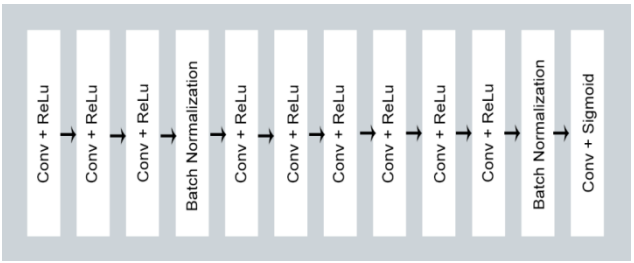


Рис. 7. Структура згорткової нейронної мережі для детектування штрих коду

Для покращення якості навчання нейронної мережі була використана аугментація (див. рис. 8). Ця техніка полягає у застосуванні заданих перетворень для зображень з датасету на кожній ітерації навчання з метою збільшення кількості різних зображень у вибірці під час навчання.

Під час навчанні нейронної мережі помилка на валідаційній вибірці мала вигляд, як на рис. 9, та модель видавала результат, який наведено на рис. 10.



Рис. 8. Приклади аугментації

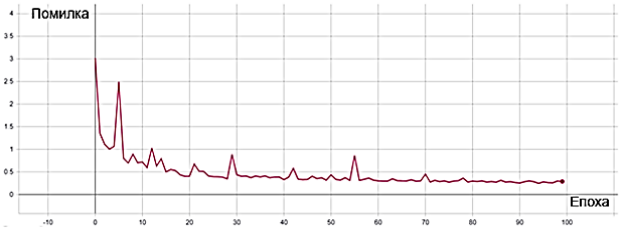


Рис. 9. Помилка на валідаційному наборі даних



Рис. 9. Вхідне зображення та вихід нейронної мережі

Порівняння результатів детектування штрих коду на основі математичної морфології та згорткової нейронної мережі. Для порівняння якості розглянутих підходів було застосовано метрики точності (precision) та повноти (recall):

$$\text{precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}},$$

$$\text{recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}},$$

де TP – кількість штрих кодів, які вірно були знайдені;

FP – кількість штрих кодів, які були знайдені помилково;

FN – кількість не знайдених штрих кодів.

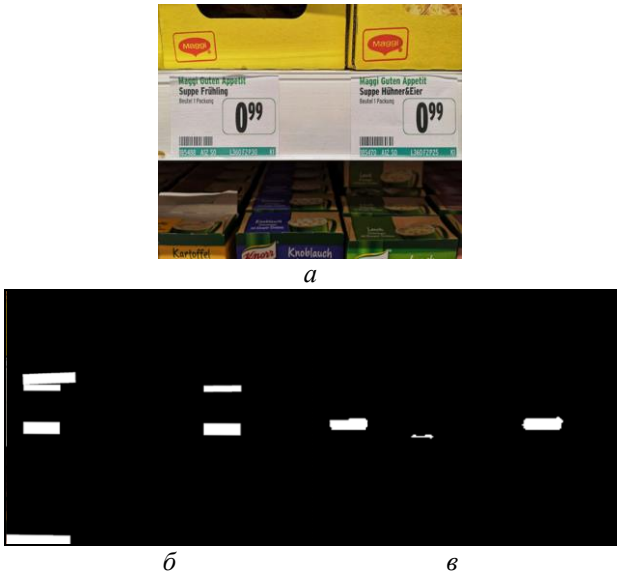
Порівнювались результати детектування штрих кодів методом морфології без використання фільтрації та нормалізації наприкінці, тобто без пост обробки, та за допомогою нейронної мережі. Для порівняння використовувалися зображення, які не були присутні у тренувальному наборі даних під час навчання мережі. Після проведення замірів на центральному процесорі швидкодії було отримано результати, що наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Оцінювання якості та швидкодії детектування на основі математичної морфології та згорткової нейронної мережі

Метод	precision	recall	Швидкість, мс
Математична морфологія	0.48	0.7058	100
Згорткова нейронна мережа	0.9714	1.0	400

Як видно з табл. 1, морфологічна морфологія поступається у якості, але вона набагато швидша. Головною проблемою методу, який побудований на математичній морфологія є те, що багато помилково виділений об'єктів. Якщо додатково проводити перевірку на декодування знайденого регіону, то можна покращити результати, але впаде швидкість, приблизно до 1 секунди на зображення, і перевага у ній буде втрачена. Недоліком згортової нейронної мережі є те, що вона не досить точно виділяє границі об'єкта і дає малі зайві елементи, але можна додатково провести пост обробку для довиділення країв та відфільтрувати елементи по значенню їх площі. На рис. 11 представлений приклад порівняння згорткової нейронної мережі та математичної морфології.

Детектування тексту за допомогою згорткової нейронної мережі. Після аналізу існуючих згорткових мереж для детектування тексту була обрана модель CRAFT [8]. Головна мета її архітектури – точно локалізувати кожний окремий символ на зображеннях. Для вилучення характерних ознак у даній архітектурі використовується мережа VGG16 [9] з пакетною нормалізацією. Модель робить об'єднання згорткових карт низького рівня подібно до U-net [10]. Кінцевий вихід має два канали: вірогідність центру символу та оцінку зв'язності символів між собою. Оцінка центру використовується для локалізації окремих символів на зображенні, а оцінка спорідненості використовується для групування кожного символу в слова. На відміну від бінарної карти сегментації, яка позначає кожний піксель дискретно, в архітектурі CRAFT використовується кодування ймовірності центру символу за допомогою Гаусової теплової карти (див. рис. 12). CRAFT дозволяє виявити великі екземпляри тексту, незважаючи на використання невеликих рецептивних полів у архітектурі. Згорткові фільтри виявляють внутрішньо символьні та міжсимвольні ознаки зв'язності, а не ознаки усього текстового рядка. Попередні підходи, такі як обмежувальні рамки, вимагають великого рецептивного поля в таких випадках.



а *б* *в*

Рис. 11. Результати детектування штрих коду на основі математичної морфології та згорткової нейронної мережі: *а* – завантажене зображення; *б* – регіони, які виділила математична морфологія (без пост обробки); *в* – регіони, які виділила нейронна мережа

Також модель CRAFT не потребує подальшої пост обробки результату, такої як non-maximum suppression, на відміну від моделей, які відносяться до two-stage методів. Вона одразу видає на вихідному зображення, яке має два канали: перший – вірогідність центру літери, закодовану Гаусіаном; другий – вірогідність міжсимвольної ознаки, також закодованою Гаусіаном. На рис. 12 наведені приклади детектування тексту. За допомогою CRAFT на ціннику знаходяться регіони з текстом, які далі аналізуються за зв'язністю, розміром, координатами відносно зображення. Вилучені символи об'єднуються у полігони, нормалізуються та передаються на розпізнавання.

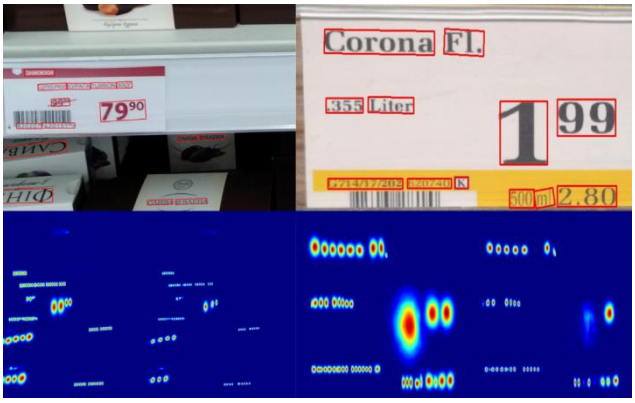


Рис. 12. Приклад знаходження тексту моделлю CRAFT

Далі необхідно провести дослідження з метою зменшення параметрів нейронної мережі, що дало би змогу запускати її на малопотужних системам, у томі

числі і на мобільних. Для підвищення швидкої під час проектування мобільного застосунку був розглянутий варіант заміни нейронної мережі на математичну морфологію.

Далі необхідно провести дослідження з метою зменшення параметрів нейронної мережі, що дало би змогу запускати її на малопотужних системам, у томі числі і на мобільних. Для підвищення швидкої під час проектування мобільного застосунку був розглянутий варіант заміни нейронної мережі на математичну морфологію.

Розпізнавання текстової інформації та штрих коду. Розпізнавання штрих коду відбувалось відкритою бібліотекою ZXing [11]. ZXing має вбудовані функції покращення зображення, які допомагають декодувати штрих код навіть на поганих фото, аналізує зображення попіксельно і видає тип коду, та його числове значення. Але має суттєвий недолік – шукає на зображенні тільки один штрих код, тому й була потреба розробляти додатково метод для пошуку кодів, а саму бібліотеку використовувати тільки для розпізнавання вже виділених об'єктів.

Для розпізнавання текстової інформації запропонована відкрита бібліотека Tesseract, яка використовує рекурентну нейронну мережу Long short-term memory (LSTM) [12, 13] (див. рис. 13). Рекурентна нейронна мережа (Recurrent neural network, RNN) – це мережа, яка має внутрішню пам'ять. Вихід для поточного значення залежить від попередніх. Кожен елемент послідовності для обробки по черзі передається одним і тим же нейронам, вихід яких повертається і разом з наступним елементом послідовності знов передається на вхід, до тих пір поки послідовність не закінчиться. Цей клас нейронних мереж добре підходить для обробки часових послідовностей або розпізнавання тексту. У цих задачах важливий контекст – тобто знання про те, що було раніше. LSTM – це модифікація звичних рекурентних мереж з метою покращення механізму запам'ятовування за забування інформації з попередніх даних та вирішення проблеми зникаючого градієнту, для цього були додані три елементи (вентилі): forget gate, input gate, output gate [13]. На рис. 13 продемонстровані результати розпізнавання текстової інформації з цінників бібліотекою Tesseract.

Алгоритм розпізнавання цінників. Таким чином, загальний алгоритм складається з трьох головних кроків:

Крок 1. Знаходження та розпізнавання опорного елемента (наприклад, штрих коду):



Рис. 13. Результат розпізнавання текстової інформації за допомогою бібліотеки Tesseract

1. Обрати спосіб знаходження опорного елементу:

Варіант 1. Математична морфологія (алгоритм наведено вище)

Варіант 2. Згорткова нейронна мережа (перевести зображення у градацію сірого; нормувати значення яскравості; обробити зображення нейронною мережею; отримати контури; провести фільтрацію; апроксимувати прямокутники та нормалізувати).

2. Віддати для розпізнавання бібліотеці ZXing.

Крок 2. Розмітка цінника за опорним елементом.

1. Розмітити по шаблону елементи цінника відповідно опорного елемента;
2. Провести нормалізацію розмічених елементів.

Крок 3. Детектування та розпізнавання інших елементів (ціни та назви)

1. У розмічених регіонах знайти інформацію для розпізнавання за допомогою згорткової мережі або математичної морфології;
2. Нормалізувати знайдені елементи;
3. Віддати елементи на розпізнавання Tesseract.

Використанні технології та розробка застосунку. Основна бібліотека написана мовою C++. Це дає змогу перенести вже існуючий код на мобільні платформи, такі як Android та iOS, без переписування усього функціоналу. Під час розробки бібліотеки для розпізнавання цінників використовувались відкрити бібліотеки OpenCV, Tesseract, ZXing, Libtorch.

Для перенесення розробленого функціоналу на систему Android використана технологія Java Native Interface (JNI). Вона зв'язує байт код Java Virtual Machine (JVM) та нативний, що був розроблений на C++. За допомогою JNI бібліотека для розпізнавання цінників була імпортована під Android та розроблений мобільний застосунок. Робота з застосунком починається з обрання шаблону цінника, що потрібно розпізнати. Шаблон цінника залежить від торгівельної мережи. Далі стає доступною камера і потрібно зробити фото, після чого запускається процес розпізнавання, результат якого виводиться на наступному екрані, разом із зробленим фото (див. рис. 14). Так як телефон, це малопотужний пристрій, то нейромережа для знаходження тексту була замінена на методи математичної морфології, які шукають текст у заданій шаблоном області.

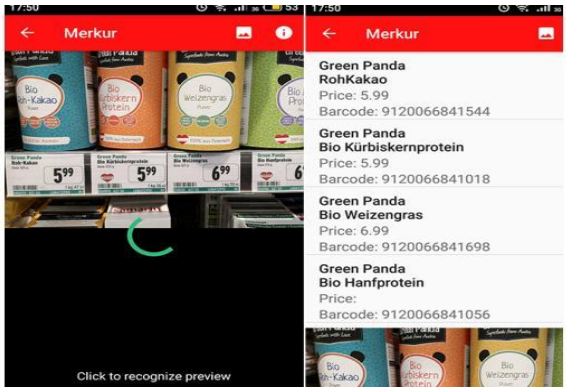


Рис. 14. Приклад роботи мобільного застосунку

Розроблений застосунок може використовуватися для автоматизації деяких операцій обліку товарів та маркетингу в торговельних секторі, наприклад, створення єдиної бази товарів та їх цін, або швидкого порівняння товарів у різних торговельних мережах.

Висновки. В роботі досліджено питання розпізнавання зображень, що містять інформацію різного типу, шляхом спільного використання класичних підходів, таких, як математична морфологія, бінаризація, фільтрація, нормалізація геометричних перетворень, та нейронних мереж для аналізу зображень та тексту. У рамках досліджень було розглянуто такі питання: розробка підходу для розпізнавання цінників на зображенні; детектування штрих коду (математична морфологія з пост обробкою, нейронна мережа); підготовка даних для навчання мережі для детектування штрих кодів (створення датасету); навчання згорткової нейронної мережі для детектування штрих кодів; порівняння результатів пошуку штрих кодів методами математичної морфології та нейронною мережею; розпізнавання штрих коду (бібліотека ZXing); детектування текстової інформації на цінніку (модель CRAFT); розпізнавання текстової інформації (бібліотека Tesseract); проектування та реалізація застосунку (мова C++, бібліотеки OpenCV, Libtorch, технологія JNI).

Порівняння методів знаходження штрих коду за допомогою математичної морфології та згорткової нейронної мережі показало, що морфологія дає значно нижчу якість детектування ніж нейронна мережа, але у декілька разів перевищує її у швидкодії. Оскільки швидкодія має велике значення для реалізації алгоритмів на мобільних пристроях, до морфології була додана обробка додатковими фільтрами та нормалізація геометричних спотворень, що суттєво поліпшило точність детектування та подальшого розпізнавання.

Також практичні дослідження щодо знаходження тексту дозволяють зробити висновок, що використана згорткова нейронна мережа CRAFT показує високу точність, але на малопотужних системах вона стає слабким місцем усього алгоритму. На малопотужних системах, як мобільні пристрої, поступаючись точністю детектування, ця мережа замінена на методи математичної морфології з фільтрацією. Тому у якості подальшого напрямку досліджень доцільно зміни частину структури моделі CRAFT, яка вилучає характерні ознаки, на більш легку, наприклад EfficientNet [14].

Також у подальшому необхідно провести тестування точності та швидкодії роботи застосунку на основі запропонованого підходу до розпізнавання цінників у цілому, поки проведено такий аналіз для окремих етапів. Розгляд даного питання дав би змогу зробити висновки щодо результатів розпізнавання більш обґрунтовано.

У цілому практичні дослідження підтвердили доцільність запропонованого підходу до розпізнавання цінників, а розроблений застосунок може бути застосований у торговельних мережах.

Список літератури

1. Serra J. *Image Analysis, Mathematical Morphology*. Academic Press, 1982. 621 p.
2. Путятин Е. П., Яковлева Е. В., Любченко В. А. Разложение матрицы центроаффинного преобразования для нормализации изображений. *Радиоэлектроника и информатика*. 1999. № 4 (05). С. 91–94.
3. *Artificial Intelligence Development Services*. URL: https://www.sytoss.com/data-science-and-neural-network (дата звернення: 10.06.2020).
4. *Image Polygonal Annotation with Python (polygon, rectangle, circle, line, point and image-level flag annotation)*. URL: https://github.com/wkentaro/labelme (дата звернення: 15.04.2020).
5. *Common Objects in Context*. URL: http://cocodataset.org/#home (дата звернення: 01.04.2020).
6. Zharkov A., Zagaynov I. *Universal Barcode Detector via Semantic Segmentation*. URL: https://arxiv.org/abs/1906.06281 (дата звернення: 10.02.2020).
7. Ioffe S., Szegedy C. *Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift*. URL: https://arxiv.org/abs/1502.03167 (дата звернення: 01.03.2020).
8. Zhou X. et. al. EAST: an efficient and accurate scene text detector. *Proceedings of the IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017. P. 5551–5560.
9. Simonyan K., Zisserman A. *Very deep convolutional networks for large-scale image recognition*. URL: https://arxiv.org/abs/1409.1556 (дата звернення: 15.05.2020).
10. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention*. Springer, Cham. 2015. P. 234–241.
11. *ZXing ("Zebra Crossing") barcode scanning library for Java, Android*. URL: https://github.com/zxing/zxing (дата звернення: 10.02.2020).
12. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural computation*. 1997. Т. 9, № 8. P. 1735–1780.
13. *Understanding LSTM Networks*. URL: https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs (дата звернення: 10.03.2020).
14. Tan M., Le Q. V. *Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks*. URL: https://arxiv.org/abs/1905.11946 (дата звернення: 20.04.2020).

References (transliterated)

1. Serra J. *Image Analysis, Mathematical Morphology*. Academic Press, 1982. 621 p.
2. Putjatin E. P., Jakovleva E. V., Ljubchenko V. A. Razlozhenie matricy centroaffinnogo preobrazovanija dlja normalizacii izobrazhenij [Centroaffine transformation matrix decomposition for image normalization]. *Radiojelektronika i informatika* [Radioelectronics and informatics]. 1996, no. 4 (05), pp. 91–94.
3. *Artificial Intelligence Development Services*. Available at: https://www.sytoss.com/data-science-and-neural-network (accessed 10.06.2020).
4. *Image Polygonal Annotation with Python (polygon, rectangle, circle, line, point and image-level flag annotation)*. Available at: https://github.com/wkentaro/labelme (accessed 15.04.2020).
5. *Common Objects in Context*. Available at: http://cocodataset.org/#home (accessed 01.04.2020).
6. Zharkov A., Zagaynov I. *Universal Barcode Detector via Semantic Segmentation*. Available at: https://arxiv.org/abs/1906.06281 (accessed 10.02.2020).
7. Ioffe S., Szegedy C. *Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift*. Available at: https://arxiv.org/abs/1502.03167 (accessed 01.03.2020).
8. Zhou X. et. al. EAST: an efficient and accurate scene text detector. *Proceedings of the IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017. pp. 5551–5560.
9. Simonyan K., Zisserman A. *Very deep convolutional networks for large-scale image recognition*. Available at: https://arxiv.org/abs/1409.1556 (accessed 15.05.2020).
10. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention*. Springer, Cham. 2015. pp. 234–241.

11. *ZXing ("Zebra Crossing") barcode scanning library for Java, Android*. Available at: https://github.com/zxing/zxing (accessed 10.02.2020).
12. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural computation*. 1997, vol. 9, no. 8. pp. 1735–1780.
13. *Understanding LSTM Networks*. Available at: https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs (accessed 10.03.2020).
14. Tan M., Le Q. V. *Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks*. Available at: https://arxiv.org/abs/1905.11946 (accessed 20.04.2020).

Надійшла (received) 11.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковтуненко Андрій Романович – Харківський національний університет радіоелектроніки, бакалавр, SYTOSS R&D Engineer; м. Харків, Україна; e-mail: andrii.kovtunenko@nure.ua

Яковлева Олена Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інформатики, м. Харків, Україна; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6129-6146; e-mail: olena.yakovleva@nure.ua

Любченко Валентин Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інформатики, SYTOSS R&D Senior Developer, м. Харків, Україна; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9966-0249; e-mail: valentyn.liubchenko@nure.ua

Янголенко Ольга Василівна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління, м. Харків, Україна; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7755-1255; e-mail: Olha.Yanholenko@khpi.edu.ua

Ковтуненко Андрей Романович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, бакалавр, SYTOSS R&D Engineer; г. Харьков, Украина; e-mail: andrii.kovtunenko@nure.ua

Яковлева Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры информатики, г. Харьков, Украина; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6129-6146; e-mail: olena.yakovleva@nure.ua

Любченко Валентин Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры інформатики, SYTOSS R&D Senior Developer, г. Харьков, Украина; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9966-0249; e-mail: valentyn.liubchenko@nure.ua

Янголенко Ольга Васильевна – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления, г. Харьков, Украина; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7755-1255; e-mail: Olha.Yanholenko@khpi.edu.ua

Kovtunenko Andrii – Kharkiv National University of Radio Electronics, bachelor, SYTOSS R&D Engineer; Kharkiv, Ukraine; e-mail: andrii.kovtunenko@nure.ua

Yakovleva Olena – Candidate of Technical Sciences, Docent, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of Informatics Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6129-6146; e-mail: olena.yakovleva@nure.ua

Liubchenko Valentyn – Candidate of Technical Sciences, Docent, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of Informatics Department, SYTOSS R&D Senior Developer, Kharkiv, Ukraine; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9966-0249; e-mail: valentyn.liubchenko@nure.ua

Yanholenko Olha – Candidate of Technical Sciences, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor of Software Engineering and Management Information Technology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7755-1255; e-mail: Olha.Yanholenko@khpi.edu.ua

УДК 311.3:778.14:004 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.06**

Н. Л. СИТНИК, О. Є. ВИНОГРАДОВА, Т. В. ТЯГУН, А. Б. МАЗНИЧКО

КЛАСИФІКАЦІЯ ДОКУМЕНТІВ СТРАХОВОГО ФОНДУ ДОКУМЕНТАЦІЇ УКРАЇНИ

Відповідно до Закону України «Про страховий фонд документації України» та Положення про Державну архівну службу України одним із основних завдань Укрдержархіву є координація і контроль за формуванням страхового фонду документації України, його веденням, утриманням і наданням користувачам копій документів страхового фонду документації, необхідних для поставлення на виробництво, експлуатацію та ремонт продукції оборонного, мобілізаційного і господарського призначення, проведення будівельних (відбудовчих), аварійно-рятувальних та аварійно-відновлювальних робіт під час ліквідації надзвичайних ситуацій та в особливий період, а також у сфері

© Н. Л. Ситник, О. Є. Виноградова, Т. В. Тягун, А. Б. Мазничко, 2020

збереження інформації про культурні цінності. Метою дослідження є встановлення єдиних принципів класифікації документів страхового фонду документації, інформація про які вноситься до Державного реєстру документів страхового фонду документації України. Висвітлено питання щодо аналізу порядку ведення Державного реєстру документів страхового фонду документації України, дослідження процесу формування реєстраційного номера документа страхового фонду документації, аналізу класифікаторів державного, відомчого, галузевого та регіонального призначення та розроблення класифікатора документів страхового фонду документації України. Класифікатор документів страхового фонду документації України призначено для використання суб'єктами державної системи страхового фонду документації під час створення, формування, ведення та використання страхового фонду документації у межах повноважень, визначених законодавством України.

Ключові слова: документ, класифікатор, класифікація, реєстр, реєстраційний номер, страховий фонд документації (СФД).

Н. Л. СЫТНИК, О. Е. ВИНОГРАДОВА, Т. В. ТЯГУН, А. Б. МАЗНИЧКО

КЛАСИФИКАЦИЯ ДОКУМЕНТОВ СТРАХОВОГО ФОНДА ДОКУМЕНТАЦИИ УКРАИНЫ

В соответствии с Законом Украины «О страховом фонде документации Украины» и Положением о Государственной архивной службе Украины одной из основных задач Укргосархива является координация и контроль за формированием страхового фонда документации Украины, его ведением, содержанием и предоставлением пользователям копий документов страхового фонда документации, необходимых для постановки на производство, эксплуатацию и ремонт продукции оборонного, мобилизационного и хозяйственного назначения, проведения строительных (восстановительных), аварийно-спасательных и аварийно-восстановительных работ при ликвидации чрезвычайных ситуаций и в особый период, а также в сфере сохранения информации о культурных ценностях. Целью исследования является установление единых принципов классификации документов страхового фонда документации, информация о которых заносится в Государственный реестр документов страхового фонда документации Украины. Освещены вопросы анализа порядка ведения Государственного реестра документов страхового фонда документации Украины, исследования процесса формирования регистрационного номера документа страхового фонда документации, анализа классификаторов государственного, ведомственного, отраслевого и регионального назначения и разработка классификатора документов страхового фонда документации Украины. Классификатор документов страхового фонда документации Украины предназначен для использования субъектами государственной системы страхового фонда документации во время создания, формирования, ведения и использования страхового фонда документации в пределах полномочий, которые определяет законодательство Украины.

Ключевые слова: документ, классификатор, классификация, реестр, регистрационный номер, страховой фонд документации (СФД).

N. L. SYTNYK, O. Y. VYNOHRADOVA, T. V. TIAHUN A. B. MAZNYCHKO

CLASSIFICATION OF DOCUMENTS OF INSURANCE FUND OF DOCUMENTATION OF UKRAINE

In accordance with the Law of Ukraine «On the Insurance Fund for Documentation of Ukraine» and the Regulation on the State Archival Service of Ukraine, one of the main tasks of the Archives of Ukraine is to coordinate and control the formation of the insurance fund of documentation of Ukraine, its conduct, retention and provision to users of copies of documents of the insurance fund of documentation necessary for putting into production, operation and repair of defense, mobilization and economic products, construction (restorations), emergency rescue and emergency recovery operations during emergency response and during a special period, as well as in the field of preservation of information about cultural property. The aim of the study is to establish uniform principles for the classification of documents of the insurance fund of documentation, information about which is entered in the State Register of documents of the insurance fund of documentation of Ukraine. The questions of the analysis of the procedure for maintaining the State Register of Documents of the Insurance Fund of Documentation of Ukraine, the study of the process formation the registration number of the document of the insurance fund of documentation, the analysis of classifiers state, departmental, sectoral and regional appointment and the development of the classifier of documents of the insurance fund of documentation of Ukraine are highlighted. The classifier of documents of the insurance fund of documentation of Ukraine is intended for use by subjects of the state system of the insurance fund of documentation during the creation, formation, maintenance and use of the insurance fund of documentation within the powers defined by the legislation of Ukraine

Keywords: document, classifier, classification, registry, registration number, Documentation Insurance Fund (SFD).

Вступ. Відповідно до Закону України «Про страховий фонд документації України» [1] та Положення про Державну архівну службу України [2] одним із основних завдань Укрдержархіву є координація і контроль за формуванням страхового фонду документації України (далі – СФД), його веденням, утриманням і наданням користувачам копій документів СФД, необхідних для поставлення на виробництво, експлуатацію та ремонт продукції оборонного, мобілізаційного і господарського призначення, проведення будівельних (відбудовчих), аварійно-рятувальних та аварійно-відновлювальних робіт під час ліквідації надзвичайних ситуацій та в особливий період, а також у сфері збереження інформації про культурні цінності.

Метою дослідження є встановлення єдиних принципів класифікації документів СФД, інформація про які вноситься до Державного реєстру документів СФД України (далі – Реєстр СФД).

Постановка проблеми. Зміни, які сталися в політичній, економічній та соціальній сферах життя України, її інтеграція в європейське співтовариство та переведення економіки на інноваційний шлях розвитку ставлять на порядок денний необхідність гармонізації нормативних документів до європейських стандартів, у тому числі й вирішення проблем класифікаційної сумісності.

Для ефективного функціонування державної системи СФД необхідно мати нормативний документ, який би встановлював єдині методологічні та організаційні засади класифікації документів СФД.

Виклад основного матеріалу. У державній системі СФД зберігається інформація різного змісту, призначення, форм подання тощо. Обсяги інформації є дуже великими та використовуються, за необхідності, усіма гілками влади та органами місцевого самоврядування, юридичними та фізичними особами.

Для встановлення єдиних науково-методичних та організаційних засад класифікації документів СФД проведено роботи з класифікації та кодування інформації з урахуванням сучасних вимог функціонування державної системи СФД [3], а також вирішено такі основні завдання:

– проаналізовано порядок ведення Реєстру СФД;

– проведено дослідження процесу формування реєстраційного номера документа СФД;

– проаналізовано класифікатори державного, відомчого, галузевого та регіонального призначення;

– розроблено класифікатор документів СФД України.

Аналіз порядку ведення Державного реєстру документів страхового фонду документації України

Згідно із Законом України [1] документ СФД – це документ, який знаходиться на державному обліку у СФД України і необхідний для поставлення на виробництво, експлуатацію та ремонт продукції оборонного, мобілізаційного і господарського призначення, для проведення будівельних (відбудовчих), аварійно-рятувальних та аварійно-відновлювальних робіт під час ліквідування надзвичайних ситуацій та в особливий період, а також для збереження культурної спадщини, на випадок утрати або псування оригіналу документа.

Реєстр СФД – це автоматизована інформаційна система державного обліку та обробки інформації, створена з метою накопичення документів СФД [4], прийнятих на довгострокове зберігання.

Реєстр СФД є власністю держави та забезпечує інформаційно-аналітичну підтримку процесів формування СФД шляхом оперативного збору, накопичення, обробки, аналізу, надання інформації, згідно з потребами і способами обробки та збереження даних СФД.

До складу Реєстру СФД входять:

– підсистема «Формування програм створення СФД» (призначена для введення та коригування напрямів створення СФД);

– підсистема «Контроль виконання планів мікрофільмування» (призначена для виконання комплексу робіт з формування планів створення документів страхового фонду та контролю за їх виконанням);

– підсистема «Облік мікрофільмів» (призначена для обліку наданих на зберігання мікрофільмів (рулонів) та надання відомостей для їх пошуку за визначеними ознаками, формування та друкування необхідних довідок та звітів);

– підсистема «Облік замікрофільмованої документації» (призначена для обліку документації страхового фонду, пошуку інформації про документи СФД);

– підсистема «Облік комплектувальних документів» (призначена для обліку та пошуку інформації за змістом мікрофільмів);

– підсистема «Документ» (призначена для надання реєстраційних номерів документам СФД та пошуку інформації щодо документів СФД за їх атрибутами);

– програмне забезпечення автоматизованих робочих місць регіональних центрів СФД (призначене для інформаційного наповнення Реєстру СФД та оформлення комплекту документів, необхідного для передавання на облік базам зберігання документів СФД).

Інформація про виготовлення або прийняття на облік документів СФД вноситься до Реєстру СФД безоплатно на підставі галузевих і обласних (регіональних) програм створення СФД та надходить від департаменту СФД Укрдержархіву, спеціальних установ СФД України (регіональних центрів СФД), що здійснюють виготовлення документів страхового фонду, та баз зберігання СФД України.

Реєстр СФД є розподіленою інформаційною системою, частини якої розташовано в регіональних центрах СФД у Києві, Львові, Одесі, Черкасах, Дніпрі та Харкові. Для функціонування всіх підсистем використовують механізми реплікації баз даних, що дозволяє синхронізувати дані, які поповнюються з різних джерел. Накопичення інформації в інформаційній системі забезпечується використанням системи керування базами даних Oracle.

Інформаційне наповнення системи здійснюється регіональними центрами СФД під час виготовлення документів СФД та під час обліку документів базами зберігання СФД. Перед введенням даних в інформаційну систему проводиться класифікація документа СФД. Залежно від виду документа заповнюється особливий перелік атрибутів (характеристик) за якими у подальшому буде здійснюватися пошук та надання інформації з Реєстру СФД.

Укрдержархів є держателем Реєстру СФД та здійснює його ведення. Ведення Реєстру СФД – це комплекс заходів, які забезпечують збір, накопичення та актуалізацію інформації про документи СФД, адміністрування бази даних Реєстру СФД, надання за запитами інформації з Реєстру СФД, розроблення (супровід) програмного забезпечення Реєстру СФД та організаційних документів щодо створення, ведення та користування його даними.

Адміністрування баз даних регіональних центрів СФД здійснюється у віддалений спосіб через шифровані канали зв'язку мережею Інтернет. Для підтримки автоматизованих робочих місць регіональних центрів СФД та Реєстру СФД в актуальному стані використовується система автоматизованого оновлення програмного забезпечення, баз даних, довідників та класифікаторів системи СФД. Вихідні файли програмного забезпечення та скриптів оновлення бази даних зберігаються в системі керування версіями Subversion, інсталяційні файли створюються за допомогою системи Inno Setup. Автоматизоване оновлення системи здійснюється шифрованими каналами зв'язку через мережу Інтернет з офіційного WEB-ресурсу.

За запитами центральних і місцевих органів виконавчої влади, органів місцевого самоврядування та постачальників документів Укрдержархів безоплатно надає їм інформацію про наявність документів у страховому фонді та реєстраційні номери документів СФД у Реєстрі СФД.

Реєстраційні номери та інформація про документи СФД виключаються з Реєстру СФД на підставі спільного рішення постачальників документів та Укрдержархіву [4].

Дослідження процесу формування реєстраційного номера документа страхового фонду документації

Реєстраційний номер надається кожному документу СФД, який прийнятий на довгострокове зберігання і містить комплекс (комплект) документів на окремий об'єкт (виріб, пам'ятку тощо), зафіксованих на мікрографічній плівці. Підставою для надання реєстраційного номера документу СФД є прийняття його на довгострокове зберігання. Цей номер входить до бази даних Реєстру СФД і зберігається незмінним протягом усього часу знаходження інформації про документ СФД у ній.

Реєстраційний номер містить оптимальну кількість інформації, необхідну і достатню для формування, ведення Реєстру СФД і здійснення оперативного пошуку документа СФД.

Реєстраційний номер документа СФД складається з 4 угрупувань у вигляді ряду літер та цифр, розділених знаками «тире» та «крапка» (див. рис. 1).



Рис. 1. Структура реєстраційного номера документа СФД

Приклад.

012150 – А.22.13 – С – 34897909,

де 012150 – чергове число документа СФД у Реєстрі СФД;

А.22.13 – скорочений код документа СФД на виріб (об'єкт, пам'ятку тощо);

С – індекс документа СФД;

34897909 – код за ЄДРПОУ постачальника документації.

Перше угрупування – чергове число документа СФД у Реєстрі СФД – містить 6 цифр «Х».

Друге угрупування – скорочений код документа СФД на виріб (об'єкт, пам'ятку тощо) – містить 1 літеру «Y» та 4 цифри «Х», розділені знаком «крапка» після літери та після двох перших цифр.

Третє угрупування – індекс, що визначає призначення документа СФД (спеціальне або господарське) – містить 1 літеру «Y».

Четверте угрупування – код за ЄДРПОУ постачальника документації – містить 8 цифр «Х» (для фізичних осіб замість коду за ЄДРПОУ надають ідентифікаційний код, який містить 10 цифр «Х») [5].

Чергове число надається документу СФД відповідно до черговості внесення інформації про нього до Реєстру СФД.

Скорочений код документа СФД на виріб (об'єкт, пам'ятку тощо) надається згідно з класифікатором СФД (секція, розділ, група, клас документа СФД).

Індекс документа СФД надається залежно від використання документа СФД для спеціального або господарського призначення і може бути відповідно з познакою «С» або «Г», про що повідомляє постачальник документів.

Відомості про постачальника документів вносяться до структури реєстраційного номера у вигляді коду за ЄДРПОУ (для фізичних осіб замість коду за ЄДРПОУ надають ідентифікаційний код) [6].

Аналізування класифікаторів державного, відомчого, галузевого та регіонального призначення

Національні (державні) статистичні класифікації (класифікатори) призначені для групування та систематизації інформації про поняття, об'єкти, явища тощо в стандартний формат, що допомагає визначити їх подібність.

Відповідно до положень законодавства, національні класифікатори прирівнюються до національних стандартів України, які, у свою чергу, ототожнюються з державними стандартами України, що прийняті центральним органом виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері стандартизації (Мінекономрозвитку), та мають бути доступними для широкого кола користувачів. Таким чином, державні класифікатори одночасно є національними класифікаторами.

Відповідно до постанови [7] з 1994 року за Державною програмою переходу на міжнародну систему обліку і статистики в Україні почали розроблятися 18 національних статистичних класифікацій, серед яких представлені ті, що ґрунтувалися на базі міжнародних аналогів: Класифікація видів економічної діяльності, Державний класифікатор продукції та послуг, Класифікатор держав світу, Класифікатор валют, Класифікатор професій, Українська класифікація товарів зовнішньоекономічної діяльності, Класифікатор одиниць виміру. Крім того, було розроблено Класифікатор об'єктів адміністративно-територіального устрою, Класифікацію основних фондів, Класифікацію послуг зовнішньоекономічної діяльності, Класифікацію видів науково-технічної діяльності.

Законом України [8] визначено, що функції національного органу стандартизації виконує державне підприємство, яке не підлягає приватизуванню, утворене Мінекономрозвитку.

Розпорядженням [9] визначено, що функції національного органу стандартизації з 03.01.2015 виконує Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»).

У міжнародній статистичній практиці основні статистичні класифікації видів економічної діяльності, продукції та товарів поєднані у взаємопов'язану систему. В Україні систему національних класифікацій розроблено на виконання постанови [7]. З огляду на це, для забезпечення можливості порівняння статистичних даних, при створенні основних національних статистичних класифікацій видів економічної діяльності, продукції, товарів як базових були використані похідні європейські класифікації у незмінному вигляді, а деталізація (дезагрегація), що враховує національні особливості, здійснена на нижчих рівнях класифікації. Такий підхід забезпечив єдину інтерпретацію національних класифікацій з міжнародними та стандартизацію термінів, визначень, пояснень.

Система національних статистичних класифікацій не є статичною, незмінною структурою і потребує постійного супроводження та удосконалення. Зміни у чинному законодавстві, перегляд міжнародних модельних статистичних класифікацій, виникнення нових потреб у вивченні певних об'єктів та явищ потребують внесення відповідних змін до класифікацій.

Основна мета ведення державних класифікаторів – підтримка в актуальному стані та своєчасне забезпечення органів державної статистики достовірною інформацією щодо змісту державних класифікаторів та внесення змін.

Виходячи з методології статистики та з огляду на її значення для економіки країни, головною національною статистичною класифікацією вважається «Класифікація видів економічної діяльності» (КВЕД).

КВЕД установлює основи для підготовлення та поширення статистичної інформації за видами економічної діяльності. Основний принцип КВЕД полягає в об'єднанні підприємств, що виробляють подібні товари чи послуги або використовують подібні процеси для створення товарів чи послуг (тобто сировину, виробничий процес, методи або технології), у групи.

Основне призначення КВЕД – визначати та кодувати основні та другорядні види економічної діяльності юридичних осіб, відокремлених підрозділів юридичних осіб, фізичних осіб-підприємців.

У багатьох країнах розроблені та застосовуються відомчі, галузеві, регіональні класифікатори. Наприклад, класифіковано: галузі промисловості, обладнання, професії, одиниці виміру, статті витрат тощо. Класифікатори розроблюються як на рівні окремих підприємств (організацій), відомств, так і на рівні держав.

Відомчі класифікатори – класифікатори, що видаються в межах компетенції того чи іншого органу виконавчої влади (міністерства, комітету, відомства), мають внутрішнє, внутрішньовідомче значення.

Наприклад, відомчі класифікатори інформації з питань державної митної справи використовуються у процесі оформлення митних декларацій і є обов'язковими для застосування всіма митними органами, спеціалізованими митними установами та організаціями, юридичними й фізичними особами, що здійснюють зовнішньоекономічну діяльність.

Загальні вимоги до впровадження, внесення змін до відомчих класифікаторів визначаються Порядком [10]. Відомчі класифікатори не містять правових норм та впроваджуються з метою виконання положень законодавчих актів для кодування інформації.

Галузеві класифікатори – це класифікатори, що використовуються в межах однієї галузі. У них відображається галузева та загальнодержавна інформація, яка має специфічні ознаки. До галузевих класифікаторів відносяться, наприклад, «Класифікатор товарів і тари», «Класифікатор сільськогосподарської продукції», «Класифікатор будівельних матеріалів» тощо.

Регіональні класифікатори використовуються в межах регіону, а також в загальнодержавних і галузевих класифікаторах для конкретних регіонів. До регіональних відносять, наприклад, «Класифікатор об'єднань і підприємств України» тощо.

Класифікатор документів СФД України

У результаті проведених досліджень розроблено новий класифікатор документів СФД України [11], який затверджено наказом Укрдержархіву від 13 лютого 2019 р. № 20.

В основу побудови класифікатора СФД України покладено принципи деталізації, які наведені в національному класифікаторі України ДК 009:2010 «Класифікація видів економічної діяльності» [12], гармонізованому з базовою міжнародною Статистичною класифікацією видів економічної діяльності Європейського Союзу – NACE (Rev. 2) [13].

Класифікатор документів СФД України забезпечує вирішення таких завдань:

– класифікація та кодування документів СФД за класифікаційними ознаками;

– уніфікація побудови та написання назв об'єктів класифікації;

– оперативний пошук документів СФД для реалізації запитів про наявність та/або відтворення документів страхового фонду;

– облік документів СФД в Реєстрі СФД;

– облік документів СФД за допомогою облікових карток.

Об'єктами класифікації є об'єкти, документація на які закладається до СФД.

Ознакою класифікації є функціональне призначення об'єктів класифікації (напрямки створення СФД), інформацію про які вносять до Реєстру СФД.

Класифікатор містить 15 секцій, які позначаються буквами української абетки А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, И, Л, М, Н, П, Р, С, Я (перший рівень класифікації). Ці літери використовуються для загальної ідентифікації інформації про документи СФД.

Класифікатор побудовано за ієрархічним методом класифікації з використанням послідовної системи кодування.

Кожна позиція у Класифікаторі містить п'ятизначний ідентифікаційний код і назву відповідних класифікаційних угруповань.

Загальна структура ідентифікаційного коду має вигляд: Y XX.XX, де Y – літера, X – цифра, та відповідає такій схемі:

Y – секція;

XX – розділ;

XX.X – група;

XX.XX – клас.

Кодові позначення розділів, груп, класів складаються із цифр від 0 до 9, причому значення 9 завжди визначає те, що не віднесено до інших угруповань в межах конкретного класу [11]. Загальну структуру класифікатора СФД наведено у табл. 1.

Висновки. Класифікатор документів СФД України встановлює єдині принципи класифікації документів СФД, інформація про які вноситься до Реєстру СФД. Його призначено для використання суб'єктами державної системи СФД під час створення, формування, ведення та використання СФД у межах повноважень, визначених законодавством України.

Таблиця 1

Категорія	Найменування
А	Документи СФД на вироби та продукцію
Б	Документи СФД на об'єкти будівництва виробничого призначення
В	Документи СФД на об'єкти систем життєзабезпечення
Г	Документи СФД на об'єкти систем транспортних зв'язків
Д	Документи СФД на об'єкти будівництва невиробничого призначення
Е	Документи СФД на об'єкти культурної спадщини. Об'єкти архітектури та містобудування
Ж	Документи СФД на об'єкти культурної спадщини. Об'єкти історичні та монументального мистецтва
И	Документи СФД об'єкти матеріальної та духовної культури (для збереження інформації про культурні цінності)
Л	Документи СФД на аварійно-рятувальні комплекти документації
М	Документи СФД на документи архівного фонду
Н	Документи СФД на об'єкти землеустрою
П	Документи СФД на об'єкти культурної спадщини. Об'єкти садово-паркового мистецтва та ландшафтні
Р	Документи СФД на об'єкти культурної спадщини. Об'єкти археологічні
С	Документи СФД на об'єкти культурної спадщини. Об'єкти науки і техніки
Я	Документи СФД на інші об'єкти

З метою визначення ефективності застосування нового Класифікатора документів СФД України, для вирішення конкретних завдань автоматизованих систем обліку, а також для визначення правильності основних принципів та положень, які закладено в його побудову, на цей час проводиться апробація Класифікатора документів СФД України за участі Науково-дослідного, проектно-конструкторського та технологічного інституту мікрографії, спеціальних установ СФД України та баз зберігання СФД України.

Список літератури

1. *Про страховий фонд документації України* : закон України від 22.03.2001 № 2332-III URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2332-14 (дата звернення: 03.03.2020).
2. *Про затвердження Положення про Державну архівну службу України* : постанова Кабінету Міністрів України від 21.10.2015 № 870 URL: http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/870-2015-п (дата звернення: 03.03.2020).
3. Кривулькін І. М., Переверзєва Л. М., Ситник Н. Л *Дослідження інформаційного наповнення бази даних Державного реєстру документів страхового фонду документації України.* НДІ мікрографії. Харків, 2017. 65 с.
4. *Про затвердження Порядку ведення Державного реєстру документів страхового фонду документації України* : постанова Кабінету Міністрів України від 16.05.2002 № 642 URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/642-2002-п (дата звернення: 03.03.2020).
5. Степаненко В. Л., Некрасов А. О., Єременко В. , Меленець А. В. СОУ 84.2-37552598-002:2012 *Страховий фонд документації. Порядок надання реєстраційного номера документу страхового фонду документації.* НДІ мікрографії. Київ: Укрдержархів, 2004. 14 с.
6. *Про доступ до публічної інформації* : закон України від 13.01.2011 № 2939-VI URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2939-17 (дата звернення: 03.03.2020).
7. *Про Концепцію побудови національної статистики України та Державну програму переходу на міжнародну систему обліку і статистики* : постанова Кабінету Міністрів України від 04.05.1993 № 326 URL: http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/326-93-п (дата звернення: 03.03.2020).
8. *Про стандартизацію* : закон України від 05.06.2014 № 1315–VII URL: http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1315-18 (дата звернення: 03.30.2020).
9. *Про визначення державного підприємства, яке виконує функції національного органу стандартизації* : розпорядження Кабінету Міністрів України від 26.11.2014 № 1163-р URL: http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1163-2014-р (дата звернення: 03.03.2020).
10. *Порядок ведення відомчих класифікаторів інформації з питань державної митної справи, які використовуються у процесі оформлення митних декларацій* URL: http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z0989-12 (дата звернення: 03.03.2020).
11. К-84.2-37552598-003:2018 *Класифікатор документів страхового фонду документації України.* Харків: НДІ мікрографії, 2018. 77 с.
12. ДК 009:2010 *Державний класифікатор України. Класифікація видів економічної діяльності.* Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 42 с.
13. *Statistical Classification of Economic Activities in the European Community*. URL: http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/5902521/KS-RA-07-015-EN.PDF (дата звернення: 03.03.2020).

References (transliterated)

1. *Pro strakhovyy fond dokumentatsiyi Ukrayiny* [About the insurance fund of documentation of Ukraine] : zakon Ukrayiny vid 22.03.2001 no. 2332-III URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2332-14 (accessed: 03.03.2020).
2. *Pro zatverdzhennya Polozhennya pro Derzhavnu arkhivnu sluzhbu Ukrayiny* [On approval of the Regulation on the State Archival Service of Ukraine] : postanova Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 21.10.2015 no. 870 URL: http://zakon0.rada.gov.ua/ laws/show/870-2015-п (accessed: 03.03.2020).
3. Kryvul'kin I. M., Pereverzyeva L. M., Sytnyk N. *L Doslidzhennya informatsiynoho napovnennya bazy danykh Derzhavnoho reyestru dokumentiv strakhovoho fondu dokumentatsiyi Ukrayiny* [Research of information filling of the database of the State register of documents of the insurance fund of documentation of Ukraine]. NDI mikrohrafiyi. Kharkiv, 2017. 65 p.
4. *Pro zatverdzhennya Poryadku vedennya Derzhavnoho reyestru dokumentiv strakhovoho fondu dokumentatsiyi Ukrayiny* : postanova Kabinetu Ministriv Ukrayiny [On Approval of the Procedure for Keeping the State Register of Insurance Fund Documents of Ukraine Documentation] vid 16.05.2002 no. 642 URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/642-2002-п (accessed: 03.03.2020).
5. Stepanenko V., Nekrasov A., Yeremenko V., Melenets' A. SOU 84.2-37552598-002:2012 *Strakhovyy fond dokumentatsiyi. Poryadok nadannya reyestratsiynoho nomera dokumentu strakhovoho fondu dokumentatsiyi* [Documentation insurance fund. The procedure for providing the registration number of the insurance fund document documentation]. NDI mikrohrafiyi. Kyyiv: Ukrderzharkhiv, 2004. 14 p.
6. *Pro dostup do publichnoyi informatsiyi* [About access to public information] : zakon Ukrayiny vid 13.01.2011 no. 2939-VI URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2939-17 (accessed: 03.03.2020).
7. *Pro Kontseptsiyu pobudovy natsional'noyi statystyky Ukrayiny ta Derzhavnu prohramu perekhodu na mizhnarodnu systemu obliku i statystyky : postanova Kabinetu Ministriv Ukrayiny* [About the Concept of Construction of National Statistics of Ukraine and the State Program of Transition to the International System of Accounting and Statistics] vid 04.05.1993 no. 326 URL:

http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/326-93-п (accessed: 03.03.2020).
8. *Pro standartyzatsiyu* [About standardization] : zakon Ukrayiny vid 05.06.2014 no. 1315–VII URL: http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1163-2014-p (accessed: 03.03.2020).
9. *Pro vyznachennya derzhavnoho pidpryyemstva, yake vykonuye funktsiyi natsional'noho orhanu standartyzatsiyi* [On the definition of a state-owned enterprise that performs the functions of a national standardization body] : rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 26.11.2014 no. 1163-r URL: http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1163-2014-p (accessed: 03.03.2020).
10. *Poryadok vedennya vidomchykh klasyfikatoriv informatsiyi z pytan' derzhavnoyi mytnoyi spravy, yaki vykorystovuyut'sya u protsesi oformlennya mytnykh deklaratsiy* [Procedure for keeping departmental classifiers of information on state customs matters used in the process of customs declaration processing] URL: http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z0989-12 (accessed: 03.03.2020).
11. K-84.2-37552598-003:2018 *Klasyfikator dokumentiv strakhovoho fondu dokumentatsiyi Ukrayiny* [Classifier of documents of insurance fund of documentation of Ukraine]. Kharkiv: NDI mikrohrafiyi, 2018. 77 p.
12. DK 009:2010 *Derzhavnyy klasyfikator Ukrayiny. Klasyfikatsiya vydiv ekonomichnoyi diyal'nosti* [State Classifier of Ukraine. Classification of economic activities]. Kyyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 2010. 42 p.
13. *Statistical Classification of Economic Activities in the European Community*. URL: http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/5902521/KS-RA-07-015-EN.PDF (accessed: 03.03.2020).

Надійшла (received) 21.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ситник Наталія Леонідівна – Науково-дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут мікрографії (НДІ мікрографії), молодший науковий співробітник; м. Харків, Україна; e-mail: nataly.sytnik1977@gmail.com

Виноградова Ольга Євгеніївна – Науково-дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут мікрографії (НДІ мікрографії), провідний інженер із стандартизації; м. Харків, Україна; e-mail: olga.kroots@gmail.com

Тягун Тетяна Володимирівна – Науково-дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут мікрографії (НДІ мікрографії), провідний інженер-проектувальник; м. Харків, Україна; e-mail: rusikesh8@gmail.com

Мазничко Андрій Борисович – Науково-дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут мікрографії (НДІ мікрографії), провідний інженер-програміст; м. Харків, Україна; e-mail: a.maznychko.ndi_m@arch.gov.ua

Сытник Наталия Леонидовна – Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт микрографии (НИИ микрографии), младший научный сотрудник; г. Харьков, Украина; e-mail: nataly.sytnik1977@gmail.com

Виноградова Ольга Евгеньевна – Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт микрографии (НИИ микрографии), ведущий инженер по стандартизации; г. Харьков, Украина; e-mail: olga.kroots@gmail.com

Тягун Татьяна Владимировна – Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт микрографии (НИИ микрографии), ведущий инженер-проектировщик; г. Харьков, Украина; e-mail: rusikesh8@gmail.com

Мазничко Андрей Борисович – Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт микрографии (НИИ микрографии), ведущий инженер-программист; г. Харьков, Украина; e-mail: a.maznychko.ndi_m@arch.gov.ua

Sytnyk Nataliia Leonidivna – project-design and technological institute of micrography (SRI micrography), Research Assistant; Kharkiv, Ukraine; e-mail: nataly.sytnik1977@gmail.com

Vynohradova Olha Yevheniivna – Scientific-research, project-design and technological institute of micrography (SRI micrography), leading standardization engineer; Kharkiv, Ukraine; e-mail: olga.kroots@gmail.com

Tiahun Tetiana Volodymyrivna – Scientific-research, project-design and technological institute of micrography (SRI micrography), leading design engineer; Kharkiv, Ukraine; e-mail: rusikesh8@gmail.com

Maznychko Andrii Borysovych – Scientific-research, project-design and technological institute of micrography (SRI micrography), leading software engineer; Kharkiv, Ukraine; e-mail: a.maznychko.ndi_m@arch.gov.ua

УДК 681.3.06 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.07**

А. Ю. БАРАНЦЕВ, Н. М. КЛИМЕНКО, І. А. ШЕВЧЕНКО

ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ОБРОБКИ ВЕЛИКИХ ДАНИХ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБЛІКУ ТА ПІДГОТОВКИ ДО ЕКСПОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ФОНДІВ АРХІВНОЇ УСТАНОВИ В ПУБЛІЧНИХ ЕЛЕКТРОННИХ МЕРЕЖАХ

Великі темпи зростання обсягу даних в інформаційних технологіях є невід'ємною складовою сучасного суспільства. Використання інформаційних технологій в архівній справі дозволяє підвищити ефективність надання державними архівними установами послуг, забезпечити популяризацію їхньої діяльності на новому якісному рівні шляхом застосування сучасних форм публікації та експонування архівних документів в електронному вигляді. Так, завдяки використанню інформаційних технологій користувачі Федерального архіву Німеччини мають можливість здійснити повнотекстовий пошук у колекції документів архіву, переглянути в зручній формі результати пошуку (зокрема у вигляді цифрованих зображень документів), а також, за потреби, замовити та сплатити певні додаткові послуги (наприклад, копію документа тощо). З аналогічною метою за підтримки ЮНЕСКО та Бібліотеки Конгресу США було створено вебсайт Світової цифрової бібліотеки. Метою дослідження є визначення належної програмної інфраструктури та об'єктної моделі організації даних, необхідних для

© А. Ю. Баранцев, Н. М. Клименко, І. А. Шевченко, 2020

забезпечення державного обліку документів Національного архівного фонду (облікової та вторинної архівної інформації) з метою створення якісної електронної експозиції та забезпечення користувачів можливістю вільного доступу до неї.

Ключові слова: цифровізація, Національний архівний фонд, архів, бібліотека, об'єктна модель, експозиція, клієнт, програмне забезпечення, сервер, Центральний державний науково-технічний архів України.

А. Ю. БАРАНЦЕВ, Н. Н. КЛИМЕНКО, И. А. ШЕВЧЕНКО

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ СОХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УЧЕТА И ПОДГОТОВКИ К ЭКСПОНИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРОННЫХ ФОНДОВ АРХИВНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ В ПУБЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СЕТЯХ

Большие темпы роста объема данных в информационных технологиях являются неотъемлемой составляющей современного общества. Использование информационных технологий в архивном деле позволяет повысить эффективность предоставления государственными архивными учреждениями услуг, обеспечить популяризацию их деятельности на новом качественном уровне путем применения современных форм публикации и экспонирования архивных документов в электронном виде. Так, благодаря использованию информационных технологий пользователи Федерального архива Германии имеют возможность осуществить полнотекстовый поиск в коллекции документов архива, просмотреть в удобной форме результаты поиска (в частности в виде цифровых изображений документов), а также, при необходимости, заказать и оплатить определенные дополнительные услуги (например, копию документа и т.д.). С аналогичной целью при поддержке ЮНЕСКО и Библиотеки Конгресса США был создано веб-сайт Всемирной цифровой библиотеки. Целью исследования является определение надлежащей программной инфраструктуры и объектной модели организации данных, необходимых для обеспечения государственного учета документов Национального архивного фонда (учетной и вторичной архивной информации) с целью создания качественной электронной экспозиции и обеспечения пользователей возможностью свободного доступа к ней.

Ключевые слова: цифровизация, Национальный архивный фонд, архив, библиотека, объектная модель, экспозиция, клиент, программное обеспечение, сервер, Центральный государственный научно-технический архив Украины.

A. Y. BARANTSEV, N. M. KLYMENKO, I. A. SHEVCHENKO

PROBLEMS ISSUES ON SAVING AND PROCESSING OF BIG DATA TO ENSURE THE ACCOUNTING AND PREPARATION FOR EXPOSURE OF ELECTRONIC FUNDS OF ARCHIVE INSTITUTION IN PUBLIC ELECTRONIC NETWORKS

Big data growth in information technology is an integral part of today's society. The use of information technologies in archival affairs allows to increase the efficiency of providing state archival institutions services, to ensure promotion of their activity at a new quality level by applying modern forms of publication and exhibiting archival documents in electronic form. So, thanks to using of information technology, users of the Federal Archives of Germany have the opportunity to search in full text search in the archive documents collection, to view in a comfortable form search results (in particular in the form of digital images of documents), and, if necessary, to order and pay for certain additional services (e.g. a copy of the document, etc.). For the same purpose, the World Digital Library website was created with the support of UNESCO and the Library of Congress. The purpose of the study is to determine the appropriate software infrastructure and an object model for organizing data needed to ensure state registration of documents of the National Archival Fund (accounting and secondary archival information) in order to create high-quality electronic exposure and provide users with free access to it.

Keywords: digitalization, national archival fund, archive, library, object model, exposition, client, software, server, Central State Scientific and Technical Archive of Ukraine.

Вступ. Великі темпи зростання обсягу даних в інформаційних технологіях (далі – ІТ) є невід'ємною складовою сучасного суспільства. Використання ІТ в архівній справі дозволяє підвищити ефективність надання державними архівними установами послуг, забезпечити популяризацію їхньої діяльності на новому якісному рівні шляхом застосування сучасних форм публікації та експонування архівних документів в електронному вигляді. Так, завдяки використанню ІТ користувачі Федерального архіву Німеччини мають можливість здійснити повнотекстовий пошук у колекції документів архіву, переглянути в зручній формі результати пошуку (зокрема у вигляді цифрованих зображень документів), а також, за потреби, замовити та сплатити певні додаткові послуги (наприклад, копію документа тощо) [1].

З аналогічною метою за підтримки ЮНЕСКО та Бібліотеки Конгресу США було створено вебсайт Світової цифрової бібліотеки [2].

Мета дослідження. Забезпечити архівні установи України можливістю ефективно вести облік та накопичення вторинної архівної інформації для надання вільного доступу до неї користувачам.

Постановка проблеми. На цей час з метою забезпечення прав громадян на вільний доступ до відомостей, потрібних для науково-дослідної, інформаційно-довідкової та іншої діяльності, державними архівними установами розроблено довідкові апарати у формі електронних баз даних (далі – БД) та створено офіційні вебсайти. На вебсайтах експонуються документи Національного архівного фонду (далі – НАФ) у вигляді тематичних експозицій. Це, наприклад, перелік електронних експозицій на вебсайті Державної архівної служби України [3] або електронна експозиція на вебсайті Центрального державного науково-технічного архіву України (далі – ЦДНТА) [4]. Такі електронні експозиції містять документи, підібрані фахівцями архівної установи за певними критеріями. Основна відмінність цих експозицій, наприклад, від експозиції Федерального архіву Німеччини полягає в тому, що в ній представлені всі документи архіву, вторинна архівна інформація та надано потужний механізм пошуку. При такому підході до побудови електронної експозиції критерії відбору документів визначає користувач, що робить її придатною для науково-дослідної та інформаційно-довідкової діяльності користувачів.

Таким чином, однією з вимог до сучасної електронної експозиції є експонування архівних документів в електронному вигляді разом з обліковою та вторинною архівною інформацією.

Одним з пріоритетів Державної архівної служби України на 2020 рік є цифровізація всіх процесів архівної справи, діловодства та державної системи страхового фонду документації. Це у свою чергу несе за собою необхідність зберігати та обробляти великі масиви даних для інформаційного забезпечення архівної справи.

Виклад основного матеріалу. Багато сучасних організацій, що використовують великі дані, не створюють належної інфраструктури, яка змогла б забезпечити надійне зберігання величезних масивів даних. Це, на наш погляд, є неправильним та містить у собі низку проблем:

– це просто багато даних (> 10 Тбайт);

– це настільки великі таблиці, що їх неможливо відкрити та проаналізувати в Excel;

– це неструктуровані дані із різних джерел, різного об'єму.

Але ми зупинимося на класичному визначенні.

Великі дані (англ. Big Data) в інформаційних технологіях – набори інформації (як структурованої, так і неструктурованої) настільки великих розмірів, що традиційні способи та підходи (здебільшого засновані на рішеннях класу бізнесової аналітики та системах керування базами даних (далі – СКБД)) не можуть бути застосовані до них. Альтернативне визначення називає великими даними феноменальне прискорення нагромадження даних та їх ускладнення.

Окрім фізичного об'єму даних, існує так звана

3-V теорія, яка підкреслює складність задачі обробки і аналізу цих даних (набір ознак VVV – volume, velocity, variety, – фізичний об'єм, швидкість приросту даних і необхідність їх швидкої обробки, здатність обробляти дані різних типів). Теорію було висунуто компанією Meta Group у 2001 році з метою наголосити на рівній значимості управління даними по всіх трьох аспектах.

Розглянемо кілька прикладів, де використовуються великі дані:

– логи сайтів, які накопичують і зберігають службову інформацію про відвідувачів;

– інформація про операції клієнтів банку;

– оцифровані книги та документи;

– інформація про покупки у великих торговельних мережах;

– сигнали GPS від автомобілів для транспортувальної компанії;

– інформація про абонентів мобільних операторів;

– та багато інших [5].

Державними архівними установами ведуться роботи з оцифрування архівних документів, а державний облік документів НАФ здійснюється також і в електронному вигляді. Але цього недостатньо для створення якісної електронної експозиції з кількох причин: по-перше, архівні електронні документи зберігаються переважно у форматах TIFF або PDF [6]. Ці формати не популярні у WEB. Так, растрові зображення у форматі TIFF не відображаються такими розповсюдженими Інтернет-оглядачами, як Mozilla Firefox, Google Chrome та Opera без встановлення додаткових компонентів. Вміст файлів у форматі PDF взагалі неможливо інтегрувати до вмісту вебсторінки. Тому завдання зі створення сучасної електронної експозиції вимагає інших форматів растрових зображень. По-друге, об'єм вмісту вторинної архівної інформації, що підлягає експонуванню, у загальному випадку може не збігатися з її повним об'ємом. Звісно, рішення про це приймається фахівцями архівної установи, які готують експозицію.

Отже, для успішного вирішення завдань зі створення інформаційних електронних ресурсів і організації доступу до них (у комп'ютеризованих читальних залах, у режимі віддаленого доступу через мережу Інтернет тощо) необхідно вести в електронному вигляді окремий облік вмісту, який може бути експоновано. Такий облік необхідно вести на захищених апаратних засобах, принаймні без доступу до публічних мереж. Це надає можливість попередньо підготувати експозицію або її частину, а в публічні мережі переносити тільки перевірені, логічно об'єднані дані.

Завданнями обліку є:

– накопичення вторинної архівної інформації;

– накопичення оцифрованих документів та розпізнаних текстів;

– перетворення графічних та текстових форматів у форму, придатну для електронної експозиції;

– систематизація накопиченої інформації за допомогою сучасних інформаційних технологій;

– відбір документів та обсягу вторинної архівної інформації, які мають бути опубліковані;

– експорт вмісту для експонування у вигляді, придатному для автоматизованого розміщення на комп'ютерних засобах у публічних електронних мережах.

Для виконання цих завдань було запропоновано спеціалізоване програмне забезпечення «Електронні фонди архіву» (далі – ПЗ Елфа), яке для ефективного ведення обліку та систематизації накопиченої інформації має низку особливостей, а саме:

– оригінальну структуру БД, яка дозволяє представити структуру облікових одиниць у вигляді графа;

– повнотекстовий пошук українською та російською мовами, що дозволяє вести пошук не тільки за іменами документів, а й за їх вмістом;

– вбудовану технологію електронного маркера E-Colorer [7], яка дозволяє наочно виділити результати пошуку на растрових зображеннях цифрових копій;

– модульний принцип побудови, що дозволяє враховувати особливості предметної області конкретної архівної установи без втручання в модулі ядра.

Для обліку застосовується об'єктно-реляційна СКБД PostgreSQL, яка надає безліч можливостей, досить надійна і має хороші характеристики за продуктивністю. Вона працює практично на всіх UNIX-платформах, включаючи UNIX-подібні системи, такі як FreeBSD і Linux. Її можна застосовувати на Windows NT Server і Windows 2000 Server, а для розробки годяться навіть такі системи Microsoft для робочих станцій, як ME. Крім того, PostgreSQL вільно поширюється і має відкритий вихідний код.

PostgreSQL вигідно відрізняється від багатьох інших СКБД. Вона володіє практично всіма можливостями, які є в інших БД (комерційних або Open Source), а також деякими додатковими.

Кожна версія перевіряється дуже ретельно, бета-версії проходять як мінімум місячне тестування. Завдяки численній спільноті користувачів і відкритому доступу до вихідного коду помилки виправляються дуже швидко.

Продуктивність цієї СКБД також зростає від версії до версії, і останні атестації показують, що при певних умовах вона не поступається комерційним продуктам. Деякі системи, що володіють не таким повним набором можливостей, перевершують PostgreSQL у продуктивності, але за рахунок втрати функціональності. Для досить простих додатків таку роль відіграє БД, що складається з плоских файлів.

Однією із сильних сторін PostgreSQL є її архітектура. Як і багато комерційних СКБД, PostgreSQL може застосовуватися в середовищі клієнт-сервер, що надає масу переваг як користувачам, так і розробникам.

Основа PostgreSQL становить серверний процес БД. Він виконується на одному сервері.

Доступ з додатків до даних бази здійснюється за допомогою процесу БД. Клієнтські програми не можуть отримати доступ до даних самостійно, навіть якщо вони працюють на тому ж комп'ютері, на якому виконується серверний процес.

Такий поділ клієнтів і сервера дозволяє побудувати розподілену систему. Можна відокремити клієнтів від сервера за допомогою мережі й розробляти клієнтські програми в середовищі, зручному для користувача. Наприклад, можна реалізувати БД під UNIX і створити клієнтські програми, які будуть працювати в системі Microsoft Windows.

Кілька клієнтів приєднуються до сервера по мережі. PostgreSQL орієнтований на протокол TCP / IP – це може бути локальна мережа або Інтернет. Кожен клієнт з'єднується з основним серверним процесом БД, який створює новий серверний процес спеціально для обслуговування запитів на доступ до даних конкретного клієнта.

Завдяки тому, що маніпулювання даними зосереджено на сервері, СКБД не доводиться контролювати численних клієнтів, які отримують доступ у спільно використовуваний каталог сервера, і PostgreSQL може підтримувати цілісність даних навіть при одночасному доступі великої кількості користувачів.

Архітектура «клієнт-сервер» робить можливим розподіл праці. Машина-сервер добре підходить для зберігання і управління доступом до великих обсягів даних, вона може використовуватися як надійний репозитарій. Для клієнтів можуть бути розроблені складні графічні додатки. Як альтернативу можна розглядати зовнішній інтерфейс на основі мережі Інтернет, який надавав би доступ до даних і повертав результат у вигляді вебсторінок у стандартний веббраузер, при цьому не потрібно було б жодного додаткового клієнтського програмного забезпечення [8].

Для забезпечення доступу користувачів до БД віддаленого доступу та документів НАФ певної архівної установи і довідкового апарату до них потрібними є:

– файловий сервер для тимчасового зберігання замовлених цифрових копій документів НАФ;

– сервер БД віддаленого доступу;

– сервер вебзастосування, за допомогою якого користувачі здійснюватимуть доступ до документів НАФ та довідкового апарату до них.

Для більшого розуміння розглянемо триланкову або по-іншому – трирівневу архітектуру систем БД, пов'язану із забезпеченням спільної роботи користувачів. Дана архітектура припускає наявність додаткового сервера додатків, який проводить попередню обробку запитів клієнтів, формує запити до сервера БД і обробляє отримані результати перед відправкою їх клієнту.

У триланковій архітектурі велика частина логіки додатка перенесена з клієнта на сервер, і завдання клієнтського додатка зводяться, в основному, до реалізації призначеного для користувача інтерфейсу і подання результатів. З'являється можливість централізовано вносити зміни в алгоритми бізнес-логіки, реалізовані в програмному забезпеченні сервера додатків. Також у цій архітектурі тільки сервер додатків може підключатися до сервера БД. Це усуває проблему підтримки невикористовуваних з'єднань і є більш переважним з точки зору безпеки. Недоліком багаторівневої архітектури «клієнт-сервер» є складність розробки подібних рішень [9].

Для нашої мети сервер вебзастосувань розташовується на виділеному сервері певної архівної установи, на ньому знаходиться й сайт.

Виділений сервер – це, зазвичай, орендований у хостинг-провайдера звичайний серверний комп’ютер, тому його потужність у порівнянні з віртуальним сервером може бути вищою в рази. Доступ до управління відбувається за допомогою віддаленого з’єднання. Операційну систему у виділеного сервера встановлюють самостійно. Такий сервер має широкий діапазон налаштувань, потрібне для роботи додаткове програмне забезпечення може бути встановлене самостійно. Усе це дозволяє налаштувати сервер для конкретних завдань.

Таке розташування вебсервера у хостинг-провайдера надає нам кілька суттєвих переваг, а саме:

– відсутність витрат значних фінансових ресурсів на придбання власного серверного обладнання;

– відсутність витрат на оренду або придбання спеціального приміщення для розміщення серверів;

– відсутність потреби в системному адміністраторі.

Об’єктна модель, яку використовує ПЗ Елфа, описує структуру об’єктів, що становлять схему класифікації архівних документів, їх атрибути та взаємозв’язки з іншими об’єктами. Характерною особливістю об’єктної моделі ПЗ Елфа є відсутність заздалегідь визначених елементів класифікації. Для кожного елемента класифікації створюється окремий тип об’єкта. Кількість типів об’єктів у ПЗ Елфа необмежена,

точніше, обмежується лише розумною достатністю. Кожному типу об'єкта задаються атрибути, кількість яких також не обмежена. Між типами визначаються зв'язки. Прикладом такої об'єктної моделі може бути класична модель «фондоутворювач – фонд – комплекс – справа – тощо». Але в ПЗ Елфа зв'язки між типами можуть бути довільними. У загальному випадку об'єктна модель ПЗ Елфа може бути представлена у вигляді розрідженого орієнтованого безконтурного графа [10]. Об'єктна модель зберігається в БД ПЗ Елфа, а її структуру визначають фахівці архівної установи за допомогою графічного інтерфейсу ПЗ Елфа.

На рис. 1 ієрархія об'єктної моделі починається з архівної установи. Це лише приклад, реальну об'єктну модель автори створили на підставі науково-дослідної роботи [11] у співпраці з ЦДНТА України. Ніщо не заважає побудувати об'єктну модель таким чином, щоб ієрархія починалася з Державної архівної служби України. У цьому випадку у ПЗ Елфа буде обліковано архівні документи всіх архівних установ. Але побудова такої об'єктної моделі потребує окремої науково-дослідної роботи.



Рис. 1. Приклад можливої об'єктної моделі ПЗ Елфа

Повнотекстовий пошук [12] у ПЗ Елфа створено на основі повнотекстового індексу, який являє собою перелік згадок слів у атрибутах об'єктів і вказівок, в яких місцях вони зустрічаються. Слова для цього переліку відбираються за допомогою спеціальних словників, таких самих, які використовуються для перевірки орфографії. До БД ПЗ Елфа підключено український та російський словники. Залежно від даних повнотекстового індексу може бути обчислена релевантність – порівняльна міра відповідності тексту атрибута до запиту. Для простоти реалізації і швидкодії пошуку при індексуванні не всі атрибути беруть участь у повнотекстовому пошуку. Набір атрибутів визначають фахівці архівної установи.

У разі повнотекстового пошуку, коли атрибутом є розпізнаний текст цифрової копії архівного документа в електронному вигляді, а в БД наявна сама цифрова копія, результати пошуку будуть показані на растровому зображенні цифрової копії з текстом, виділеним за допомогою електронного маркера.

Ще одна відмінність програми – це модульний принцип побудови, який зображено на рис. 2 у вигляді діаграми модулів.

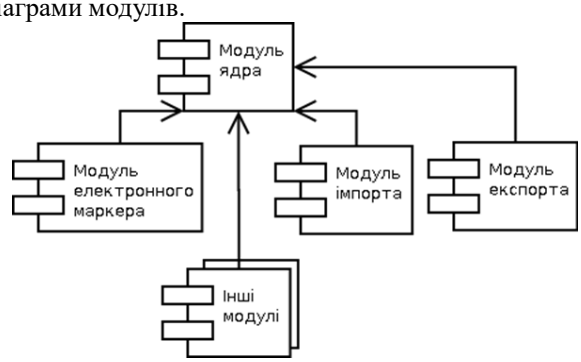


Рис. 2. Діаграма модулів ПЗ Елфа

Модульний принцип робить ПЗ Елфа універсальним для різних архівних установ. При використанні модульного принципу достатньо розробити додатковий програмний модуль для урахування особливостей предметної області кожної конкретної архівної установи. Модуль ядра при цьому залишається незмінним. У першу чергу це стосується модулів імпорту та експорту.

Модуль імпорту враховує той факт, що електронні облікові таблиці і бази даних у кожній архівній установі можуть мати свої форми та зберігатися в різних форматах, таких як MS Word, Excel тощо.

Модуль експорту враховує той факт, що архівні установи для публікації та експонування архівних документів можуть користуватися послугами різних Інтернет-провайдерів, які виставляють свої умови для розміщення документів у публічних електронних мережах.

Наразі ПЗ Елфа проходить дослідну експлуатацію на технічних засобах ЦДНТА України. Для забезпечення обліку та систематизації архівної інформації фахівцями ЦДНТА України здійснюється наповнення БД ПЗ Елфа. До БД вже внесено відомості стосовно:

– фондоутворювачів та історії їх перейменувань;
– фондів;
– комплексів.

Також до БД внесено зміст:

– описів (що наявні в електронному вигляді);
– частини систематичного каталогу;
– частини проектного каталогу;
– географічного каталогу;
– іменного каталогу.

Для спрощення наповнення БД у ПЗ Елфа передбачено операцію з імпорту архівних каталогів, описів тощо за умови, що вони зберігаються у форматах MS Word 97–2003 (.doc), MS Word 2007–2013 (.docx), MS Excel 97–2003 (.xls), MS Excel 2007–2013 (.xlsx), OpenDocument Text (.odt) та OpenDocument Spreadsheet (.ods). Після імпорту файли вищезазначених архівних каталогів та описів зберігаються у БД програми. Також до БД ПЗ Елфа завантажені наявні цифрові копії аркушів документів НАФ із розпізнаним

текстом. Це надає можливість здійснення пошуку не тільки за атрибутами облікових одиниць, а й за змістом архівних документів.

Повнофункціональна демонстраційна версія ПЗ Елфа доступна за посиланням: http://micrography.gov.ua/info-res-adof/other/elfademo.zip.

Висновки. Таким чином, упровадження ПЗ Елфа підвищить ефективність обліку архівних документів, придатних для експонування в електронному вигляді, та вторинної архівної інформації. Це у свою чергу ще на крок наблизить користувачів архівних установ до отримання вільного доступу до відомостей, потрібних для наукової діяльності. Підходи до побудови ПЗ Елфа дозволяють використовувати його в будь-якій архівній установі.

Список літератури

1. *Das Bundesarchiv*. URL: https://www.bundesarchiv.de (дата звернення: 16.03.2019).
2. *Світова цифрова бібліотека*. URL: https://www.wdl.org (дата звернення: 16.03.2019).
3. *Документальні виставки on-line* / Державна архівна служба України. URL: https://old.archives.gov.ua/Sections/Vystavky-\region.php (дата звернення: 16.03.2019).
4. *Виставки on-line* / Центральний державний науково-технічний архів України URL: https://cdnta.archives.gov.ua/index.php/uk\/exhibitions-uk (дата звернення: 16.03.2019).
5. *Великі дані*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Великі_дані (дата звернення: 16.03.2019).
6. *Перелік форматів даних електронних документів постійного і тривалого (понад 10 років) зберігання* : затверджено наказом Міністерства юстиції України від 11.11.2014 № 1886/5, зареєстровано в Міністерстві юстиції України від 11.11.2014 за № 1422/26199 / уклад. П. М. Марченко, Ю. С. Ковтанюк; Державна архівна служба України. Київ: УНДІАСД, 2011. 10 с.
7. Баранцев А. Ю. Поиск и отображение информации на растровых изображениях текстов, содержащихся в электронных документах. *Студії з архівної справи та документознавства* / Держ. архів. служба України. Київ: УНДІАСД, 2012. Т. 20, С. 136–139.
8. *Что такое PostgreSQL? Плюсы и минусы бесплатной базы данных*. URL: https://oracle-patches.com/common/3214-что-такое-postgresql (дата звернення: 16.03.2019).
9. Нестеров С. А. *Бази Даних*. Москва: Юрайт, 2017. 230 с.
10. Оре О. *Теория графов*. Москва: УРСС, 2008. 352 с.
11. *Дослідження перспектив застосування інтернет-технологій для забезпечення віддаленого доступу до документів НАФ, що зберігаються в ЦДНТА України, та довідкового апарату до них* / звіт про НДР (заключний); НДІ мікрографії; наук. кер. С. В. Ільїн. Харків, 2016. 68 с.
12. *Введение в полнотекстовый поиск в PostgreSQL*. URL: http://www.sai.msu.su/~megera/postgres/talks/fts_pgsql_intro.html (дата звернення: 16.03.2019).

References (transliterated)

1. *Das Bundesarchiv* URL: http:// https://www.bundesarchiv.de (accessed 16.03.2019).
2. *Svitova cyfrova biblioteka*. URL: https://www.wdl.org (accessed 16.03.2019).
3. *Dokumental'ni vystavky on-line* / Derzhavna arhivna sluzhba Ukrai'ny. Kyi'v2017. URL: https://old.archives.gov.ua/Sections\/Vystavky-region.php (accessed 16.03.2019).
4. *Vystavky on-line* / Central'nyj derzhavnyj naukovo-tehnichnyj arhiv Ukrai'ny URL https://cdnta.archives.gov.ua/index.php/uk\/exhibitions-uk (accessed 16.03.2019).
5. *Velyki_dani*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Великі_дані (accessed 16.03.2019).
6. *Perelik formativ danyh elektronnyh dokumentiv postijnogo i tryvalogo (ponad 10 rokiv) zberigannja:* zatverdzheno nakazom Ministerstva justycii' Ukrai'ny 11.11.2014 r., № 1886/5, zarejestrovano v Ministerstvi justycii' Ukrai'ny 11.11.2014 r. za № 1422/26199 / ukladachi: P. M. Marchenko, Ju. S. Kovtanjuk; Derzhavna arhivna sluzhba Ukrai'ny, UNDIASD. Kyi'v, 2011. 10 p.
7. A. Barancev. Poisk i otobrazhenie informacii na rastrovyh izobrazhenijah tekstov, soderzhashhihsja v jelektronnyh dokumentah. *Studii' z arhivnoi' spravy ta dokumentoznavstva*. T. 20. Kyi'v, 2012. 136–139 p.
8. *Chto takoe PostgreSQL? Pljusyy y mynusyy besplatnoj bazyy dannyyh*. URL: https://oracle-patches.com/common\/3214-что-такое-postgresql (accessed 16.03.2019).
9. Nesterov S. A. *Bazy Danyh* [Database]. Moskva: Jurajt, 2017. 230 p.
10. O. Ore. *Teoryja grafov* [Graph theory]. Moskva: URSS, 2008. 352 p.
11. *Doslidzhennja perspektyv zastosuvannja internet-tehnologij dlja zabezpechennja viddalenogo dostupu do dokumentiv NAF, shho zberigajut'sja v CDNTA Ukrai'ny, ta dovidkovogo aparatu do nyh* / NDI mikrografii'; zvit pro NDR (zakljuchnyj); nauk. ker. S. V. Il'i'n. Harkiv, 2016. 68 p.
12. *Vvedenie v polnotekstovyj poisk v PostgreSQL*. URL: http://www.sai.msu.su/~megera/postgres/talks/fts_pgsql_intro.html (accessed 16.03.2019).

Надійшла (received) 21.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Баранцев Андрій Юрійович – Науково-дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут мікрографії (НДІ мікрографії), науковий співробітник; м. Харків, Україна; e-mail: barantsev@micrography.gov.ua

Клименко Наталія Миколаївна – Науково-дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут мікрографії (НДІ мікрографії), провідний інженер-програміст; м. Харків, Україна; e-mail: klimenko@micrography.gov.ua

Шевченко Ігор Андрійович – Науково-дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут мікрографії (НДІ мікрографії), інженер-технолог І категорії; м. Харків, Україна; e-mail: shevchenko@micrography.gov.ua

Баранцев Андрей Юрьевич – Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт микрографии (НИИ микрографии), научный сотрудник; г. Харьков, Украина; e-mail: barantsev@micrography.gov.ua

Клименко Наталья Николаевна – Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт микрографии (НИИ микрографии), ведущий инженер-программист; г. Харьков, Украина; e-mail: klimenko@micrography.gov.ua

Шевченко Игорь Андреевич – Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт микрографии (НИИ микрографии), инженер-технолог I категории; г. Харьков, Украина; e-mail: shevchenko@micrography.gov.ua

Barantsev Andrii Yuriiovych – project-design and technological institute of micrography (SRI micrography), Research Officer; Kharkiv, Ukraine; e-mail: barantsev@micrography.gov.ua

Klymenko Nataliia Mykolaivna – project-design and technological institute of micrography (SRI micrography), leading software engineer; Kharkiv, Ukraine; e-mail: klimenko@micrography.gov.ua

Shevchenko Ihor Andriiovych – project-design and technological institute of micrography (SRI micrography), engineer-technologist of the I category; Kharkiv, Ukraine; e-mail: shevchenko@micrography.gov.ua

УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 62-52 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.08**

А. С. КУЦЕНКО, С. В. КОВАЛЕНКО

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СТУПЕНЧАТОЙ ТРАНСМИССИЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Рассматривается актуальная задача оптимального выбора передаточных чисел трансмиссии транспортных средств (ТС), оснащенных двигателями внутреннего сгорания (ДВС) со ступенчатой коробкой передач, по критерию минимального расхода топлива. Анализ научно-технической литературы показал отсутствие простых и достаточно обоснованных алгоритмов управления энергоустановкой автомобиля, представляющей собой систему, состоящую из ДВС и регулируемой трансмиссии. Целью настоящей работы является теоретическое обоснование закона переключения передаточных чисел ступенчатой трансмиссии, обеспечивающего максимальную топливную экономичность для любого мощного и скоростного режима ТС. В основу предлагаемого метода положено однопараметрическое множество линейных преобразований, связывающих момент двигателя и его частоту вращения с тяговым усилием и скоростью ТС. Множеству передаточных чисел трансмиссии соответствует множество одноэкстремальных функций удельных расходов топлива. Множество точек линий равных уровней расходов топлива, соответствующих двум соседним значениям передаточных чисел трансмиссии, образует линию переключения передач. Предложен соответствующий алгоритм переключения передаточных чисел, обеспечивающий наиболее экономичное функционирование энергоустановки ТС в условиях переменных силовых и скоростных режимов.

Ключевые слова: автоматическая трансмиссия, оптимальное управление, транспортное средство, универсальная характеристика двигателя, линия переключения передач, топливная экономичность.

О. С. КУЦЕНКО, С. В. КОВАЛЕНКО

ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ СТУПІНЧАСТОЮ ТРАНСМІСІЄЮ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Розглядається актуальна задача оптимального вибору передавальних чисел трансмісії транспортних засобів (ТЗ), оснащених двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) із ступінчастою коробкою передач, за критерієм мінімальної витрати палива. Аналіз науково-технічної літератури показав відсутність простих і досить обгрунтованих алгоритмів управління енергоустановкою автомобіля, що представляє собою систему, яка складається з ДВЗ та регульованої трансмісії. Метою цієї роботи є теоретичне обгрунтування закону перемикання передавальних чисел ступінчастої трансмісії, що забезпечує максимальну паливну економічність для будь-якого потужного і швидкісного режиму ТЗ. В основу запропонованого методу покладено однопараметричну множину лінійних перетворень, що пов'язують момент двигуна та його частоту обертання з тяговим зусиллям та швидкістю ТЗ. Множині передавальних чисел трансмісії відповідає множина одноекстремальних функцій питомих витрат палива. Множина точок ліній рівних рівнів витрат палива, що відповідають двом сусіднім значенням передавальних чисел трансмісії, утворює лінію перемикання передач. Запропоновано відповідний алгоритм перемикання передавальних чисел, що забезпечує найбільш економічне функціонування енергоустановки ТЗ в умовах змінних силових і швидкісних режимів.

Ключові слова: автоматична трансмісія, оптимальне управління, транспортний засіб, універсальна характеристика двигуна, лінія перемикання передач, паливна економічність.

O. S. KUTSENKO, S. V. KOVALENKO

OPTIMAL CONTROL OF A STEP-BY-STEP TRANSMISSION OF VEHICLES

The actual problem of optimal selection of means of transport (MT) gear ratios, equipped with internal combustion engines (ICE) with a step-by-step gearbox according to the criterion of minimum fuel consumption is considered in the article. An analysis of the scientific and technical literature has showed the absence of simple and sufficiently justified algorithms for controlling the vehicle's power plant, which is a system that consists of an ICE and an adjustable transmission. The aim of this work is the theoretical justification of the law of gear ratios shifting of a step-by-step transmission, ensuring maximum fuel efficiency for any power and speed mode of MT. The proposed method is based on set of linear transformations that connect the engine moment and engine speed with a traction force and a speed of MT. The set of gear ratios correspond to the set of one-extremal functions of specific fuel consumptions. The set of points of equal levels lines corresponding to two neighboring values of the gear ratios of the transmission forms a gear shift line. An appropriate algorithm for switching gear ratios is proposed, which ensures the most efficient operation of a power plant of MT in conditions of variable power and speed modes.

Keywords: automatic transmission, optimal control, vehicle, universal engine performance, gear shift line, fuel efficiency.

Введение. Скорость автомобиля и тяговое усилие на его колесах во время движения изменяются в широких диапазонах. Эти изменения обусловлены различными дорожными и погодными условиями, взаимодействием с другими участниками дорожного движения, а также требованиями к интенсивности

© А. С. Куценко, С. В. Коваленко, 2020

выполнения транспортной работы. Для увеличения диапазона тягового усиления на колесах со стороны двигателя широкое распространение получили механические коробки передач, обладающие высоким коэффициентом полезного действия и надежностью. Управление транспортным средством с двигателем внутреннего сгорания и механической коробкой передач заключается в рациональном сочетании выбранного передаточного числа и положения органа управления топливоподачей. Правильный выбор необходимого передаточного отношения позволяет с одной стороны максимально реализовать динамические качества транспортного средства, а с другой – повысить топливную экономичность и снизить выбросы вредных веществ с отработавшими газами.

Особенно важными эти обстоятельства представляются при городском движении, когда двигатель в основном работает на частичных режимах нагружения. Ниже будет рассмотрен один из возможных подходов к проблеме выбора необходимой передачи в зависимости от скорости движения и требуемого усилия на колесах автомобиля, исходя из требований максимальной экономичности энергоустановки.

Анализ исследований и публикаций. Проблеме рационального конструирования трансмиссии транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания и организации процесса управления энергоустановкой в целом посвящено множество публикаций, что явилось закономерным следствием совершенствования автомобильного транспорта в направлении автоматизации процессов управления основными силовыми элементами – двигателем и трансмиссией. Исторически сложилось так, что задача управления частотой вращения и мощностью двигателей внутреннего сгорания стала одной из основополагающих для интенсивного развития теории автоматического управления [1, 2]. В подавляющем большинстве работ по автоматическому управлению ДВС рассматривался как объект управления не связанный с трансмиссией. Взаимодействие с трансмиссией было представлено в виде момента сопротивления, приведенного к коленчатому валу ДВС, и рассматривалось в качестве возмущающего воздействия.

Аналогичным образом, фундаментальные исследования в области трансформации механической энергии, вырабатываемой ДВС, сформированные в основополагающей теории силового потока [3], развивались применительно к трансмиссии как отдельному элементу энергосиловой системы автомобиля.

Повышение требований к экономичности автотранспорта и концентрации выбросов токсических компонент продуктов сгорания привело к необходимости привлечения системного подхода к проблеме конструирования и эксплуатации энергосиловых установок автомобилей. Системный подход, прежде всего, коснулся вопросов проектирования энергосилового агрегата «ДВС – трансмиссия».

Так в работах [4–7] обобщены исследования, связанные с созданием теоретических и расчетных методов анализа и синтеза параметров энергосиловой установки автомобиля, оптимизации ряда передаточных чисел коробки передач и законов переключения. В работе [4] предложен обобщенный критерий оптимальности, включающий экономичность при городской езде и магистральном движении, при фиксированных скоростях и других характерных режимах движения. Задача оптимизации предложенного критерия рассматривалась в условиях ограничений на тягово-скоростные свойства автомобиля, обусловленные характеристикой ДВС. Основным недостатком рассматриваемого подхода является субъективность выбора весовых коэффициентов, формирующих обобщенный критерий на основе частных.

В работах [8, 9] проведен глубокий анализ и математическое моделирование процессов в системе «ДВС – механическая трансмиссия – автомобиль». Предложена библиотека алгоритмов управления коробкой передач, ориентированная на конечный набор типичных ситуаций возникающих на практике: плавный старт, разгон, переключение передач. В основу проектирования положена многокритериальная постановка задачи оптимизации ряда передаточных чисел коробки передач, которая сводится к Парето множеству вариантов. Выбор конкретного решения предлагается искать на основе субъективного принятия решения.

Основным недостатком исследований [4–9] и аналогичных им является ориентация на математическую модель автомобиля как механической системы, содержащей множество конструктивных параметров, часть которых известна приближенно.

Кроме того, совершенно не учитываются процессы изменения конструктивных параметров автомобиля при эксплуатации, а следовательно, и влияние этих изменений на величину выбранных критериев оптимизации. Иными словами – сложность математической модели и многокритериальность задач оптимизации не позволяют надеяться на обоснованное решение реальной практической задачи управления системой «ДВС – трансмиссия – автомобиль».

В противовес описанному выше направлению исследований в работах [10, 11, 12] рассматривается упрощенный подход к управлению энергоустановкой автомобиля. Так в работе [11] автором предложен способ повышения топливной экономичности ДВС путем организации работы двигателя на режимах, соответствующих характеристике минимальных значений удельного эффективного расхода топлива с применением универсальной характеристики двигателя. Автором предложен метод выбора передаточного числа коробки передач, обеспечивающего наиболее экономичный режим работы двигателя путем сравнения удельных эффективных расходов топлива на альтернативных передачах.

В [12] предлагается минимизировать расход топлива путем поддержания режимов соответствующих экономической характеристике выбором оптимального передаточного числа с одновременным воздействием на систему управления топливоподачей. Такой подход может быть реализован только в случае

бесступенчатой (электрической, гидравлической) трансмиссии.

Цель и задачи исследования. Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что отсутствуют практически реализуемые методы и алгоритмы автоматического управления энергосиловой установкой автомобиля, обеспечивающие наибольшую экономичность в нестационарных условиях скорости и мощности ТС. Как следует из статистических данных [13] совместное распределение скорости и мощности автомобиля при городской езде имеет широкий разброс во всем допустимом диапазоне функционирования энергоустановки. Каждому из режимов ТС может соответствовать множество значений коэффициента передачи трансмиссии. Обоснование выбора наилучшего, с точки зрения экономичности, значения передаточного числа трансмиссии из заданного дискретного множества и составляет цель настоящего исследования.

Рис. 2. Универсальная характеристика ДВС

Математическая модель транспортной энергоустановки. Режим работы ДВС характеризуется в основном двумя параметрами: M – эффективным моментом вала и ω – угловой скоростью коленчатого вала. Далее пару $(M, \omega) = \boldsymbol{x}$ будем называть вектором состояния ДВС. В силу различных физических обстоятельств [1] на вектор $\boldsymbol{x}$ наложен ряд ограничений, т.е. $\boldsymbol{x} \in \Gamma$, где Γ – заданная область на плоскости (M, ω), имеющая структуру, изображенную на рис. 1.

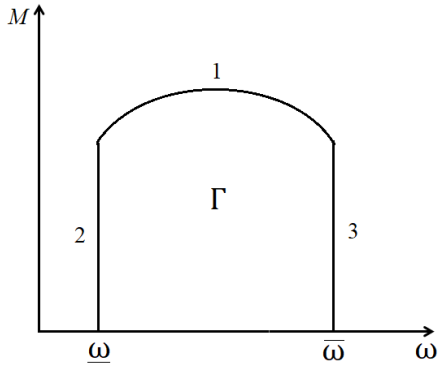


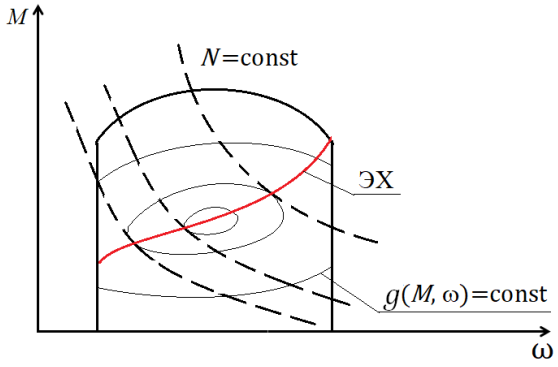
Рис. 1. Область допустимых значений вектора состояния ДВС

Область Γ ограничена внешней характеристикой двигателя – 1, минимальной $\underline{\omega}$ и максимальной $\overline{\omega}$ частотами вращения – линии 2 и 3 соответственно.

Множеству точек $(M, \omega) \in \Gamma$ можно поставить в соответствие функцию $g(M, \omega)$, представляющую собой удельный расход топлива, затраченного на единицу вырабатываемой эффективной мощности ДВС. Функция $g(M, \omega)$ определяется экспериментально для каждого типа двигателя и, как правило, задается в виде множества линий равных удельных расходов внутри области Γ. Функция $g(M, \omega)$ обычно одноэкстремальна и имеет минимум внутри Γ. Линии уровня типичной функции $g(M, \omega)$ показаны на рис. 2.

Кроме линий уровня $g(M, \omega) = \text{const}$ на рис. 2 приведено семейство линий равной мощности

$$N = M\omega = \text{const}.$$



Множество точек касания линий уровня $g(M, \omega)$ и линий уровня $N(M, \omega)$ образуют так называемую экономическую характеристику (ЭХ), характеризующуюся минимальным расходом топлива для заданной мощности.

По аналогии с вектором состояния двигателя введем вектор состояния транспортного средства $\boldsymbol{y} = (F, V)$, представляющий собой тяговое усилие F и скорость движения V. Будем в дальнейшем предполагать, что все величины M, ω, F, V заданы в безразмерных относительных координатах. Векторы $\boldsymbol{y}$ и $\boldsymbol{x}$ связаны между собой передаточными числами k трансмиссии

$$\begin{aligned} F &= kM, \\ V &= k^{-1}\omega, \end{aligned} \qquad (1)$$

или в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} F \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k & 0 \\ 0 & k^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M \\ \omega \end{pmatrix}. \qquad (2)$$

Преобразование (2) $\boldsymbol{y} = \varphi_k(\boldsymbol{x})$ обладает следующими свойствами: оно отображает гиперболы в гиперболы, взаимно однозначно и линейно, а определитель его матрицы (2) $\det \text{diag}\{k, k^{-1}\} = 1$. Таким образом, преобразование $\varphi_k(\boldsymbol{x})$ унитарно. Преобразование (2) отображает прямые линии в прямые, а прямые, параллельные координатным осям, в аналогичные прямые. Кроме того, преобразование φ_k сохраняет площадь замкнутой фигуры.

В результате преобразования φ_k область Γ отобразится в область Γ_k на плоскости (F,V). Соответствующим образом отобразятся также и линии уровня $g(M, \omega) = \text{const}$. Взаимно однозначное соответствие между точками областей Γ и Γ_k определяет соответствие между параметрами нагрузки двигателя в установившемся режиме при передаточном отношении трансмиссии k.

Рассмотрим теперь множество $K = \{k_1, k_2, \ldots, k_n\}$ передаточных чисел трансмиссии, расположенных в порядке убывания. Каждому k_i соответствует преобразование вида (2) φ_{k_i}, а каждому φ_{k_i} соответствует область Γ_{k_i} – отображение Γ на плоскость (F,V) с

передаточным числом k_i. Объединение множеств Γ_{k_i} (рис. 3) представляет собой множество допустимых режимов транспортной системы Γ_Σ

$$\Gamma_\Sigma = \cup_{i=1}^{n} \Gamma_{k_i}.$$

Область Γ_Σ при любом наборе k_i $(i = 1, \ldots, n)$ удовлетворяет условию

$$\Gamma_\Sigma \subset \Gamma_{\max},$$

где $\Gamma_{\max}$ – область, ограниченная гиперболой максимальной мощности $N_{\max}$ и координатными осями.

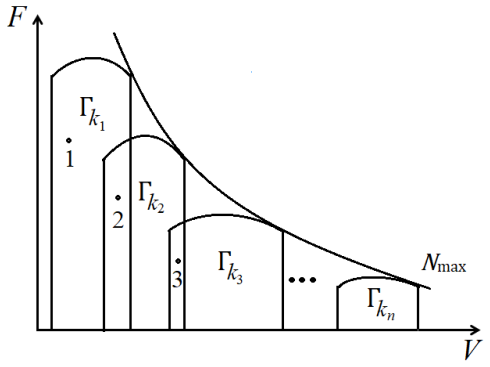


Рис. 3. Множество допустимых режимов транспортного средства при n -ступенчатой трансмиссии

Построение линии переключения передач. Как видно из рис. 3 один и тот же вектор режима транспортного средства может быть реализован при различных значениях передаточных чисел. Так режимы 2 и 3 могут быть реализованы при двух значениях передаточных чисел, а режим 1 – только при одном значении из возможных передаточных чисел.

Возникает естественная задача выбора передаточного числа трансмиссии из множества допустимых, при котором экономичность двигателя будет максимальной для заданного вектора режима (F,V). Ограничимся случаем выбора из двух возможных альтернатив, характеризующихся передаточными числами k_1 и k_2. На рис. 4 приведены допустимые области Γ_1 и Γ_2 использования передаточных чисел k_1 и k_2 соответственно

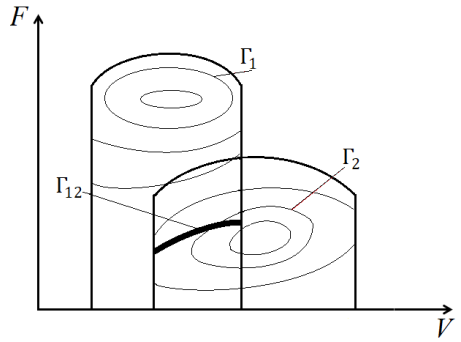


Рис. 4. Допустимые области вектора состояния транспортного средства при двух передаточных числах

Область альтернативного выбора Γ_{12} представляет собой пересечение $\Gamma_{12} = \Gamma_1 \cap \Gamma_2$. Объединение областей $\Gamma_1 \cup \Gamma_2$ представляет область допустимых режимов с передаточными числами k_1 или k_2. Область $\Gamma_1 \backslash (\Gamma_1 \cap \Gamma_2)$ представляет собой область, в которой можно использовать только передаточное число k_1, а $\Gamma_2 \backslash (\Gamma_1 \cap \Gamma_2)$ – только k_2.

Таким образом, задача выбора оптимального передаточного числа, обеспечивающего минимальный расход топлива в области режимов Γ_{12}, сводиться к разделению Γ_{12} на две подобласти Γ_{12}^1 и Γ_{12}^2, которым соответствуют передаточные числа k_1 и k_2, минимизирующие величину $g(M, \omega)$.

Для нахождения областей Γ_{12}^1 и Γ_{12}^2 построим на плоскости (F,V) функции $G^1(F,V)$ и $G^2(F,V)$, соответствующие преобразованиям φ_{k_1} и φ_{k_2} функции $g(M,n)$. Соответствующие линии уровня G^1 и G^2 приведены на рис. 4. Уравнения поверхностей $G^1(F,V)$ и $G^2(F,V)$ примут вид

$$G^1(F,V) = g\left(\frac{F}{k_1}, k_1 V\right), \quad (3)$$

$$G^2(F,V) = g\left(\frac{F}{k_2}, k_2 V\right). \quad (4)$$

Приравнивая удельные расходы G^1 и G^2 между собой, получим уравнение линии переключения передач L в координатах (F,V), представляющую собой множество точек пересечения линий равного уровня функций $G^1(F,V)$ и $G^2(F,V)$ (рис 4).

Из (3) и (4) следует, что уравнение линии переключения имеет вид

$$g\left(\frac{F}{k_1}, k_1 V\right) = g\left(\frac{F}{k_2}, k_2 V\right). \quad (5)$$

Линия L является границей разделения области Γ_{12} на подобласти Γ_{12}^1 и Γ_{12}^2.

Поскольку по оси абсцисс область Γ_{12} ограничена величинами $\underline{V}_2$ и $\underline{V}_1$, соответствующими минимальной и максимальной частотам вращения двигателя на 2-й и 1-й передачах соответственно, то линию переключения L следует дополнить линиями L_1 и L_2 (рис. 5), на которых необходимо осуществлять переключение передач в связи с ограничениями по допустимой частоте вращения двигателя.

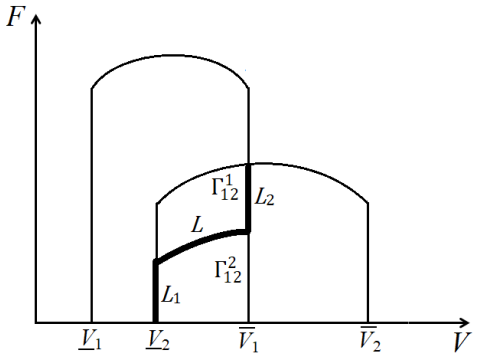


Рис. 5. Линия переключения передач

Таким образом, составную линию $L_\Sigma = L_1 L\, L_2$ можно рассматривать как суммарную линию переключения передач с учетом как экономического фактора, так и фазовых ограничений на процесс управления. Окончательно закон управления передаточным числом трансмиссии примет вид

$$k = \begin{cases} k_1 \text{ при } \boldsymbol{y} \in \Gamma_1 \backslash \Gamma_{12}^2, \\ k_2 \text{ при } \boldsymbol{y} \in \Gamma_2 \backslash \Gamma_{12}^1. \end{cases} \quad (6)$$

Для реализации процесса управления трансмиссией более удобно представлять линию переключения передач (6) в координатах (M, ω), соответствующих ДВС. Для этого подставим в выражение (5) отображения (1). Естественно, что линия переключения передач в пространстве (M, ω) будет иметь два образа, соответствующих передаточным числам k_1 и k_2

$$g(M, \omega) = g\left(\frac{k_1}{k_2} M, \frac{k_2}{k_1} \omega\right), \quad (7)$$

$$g(M, \omega) = g\left(\frac{k_2}{k_1} M, \frac{k_1}{k_2} \omega\right), \quad (8)$$

получающихся в результате подстановки в (5) соотношений (1) для передаточных чисел k_1 и k_2. Образы линии переключения L (5) и (6), а также линий L_1 и L_2 – ограничений по частотам вращений коленчатого вала на соответствующих передачах представлены на рис 6.

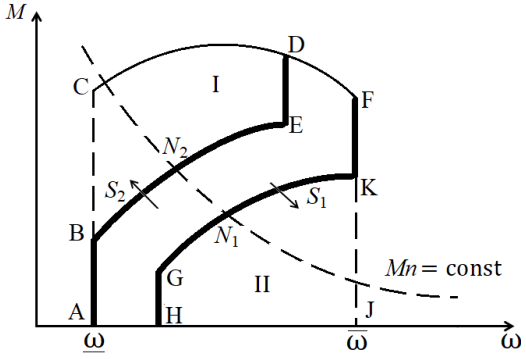


Рис. 6. Линия переключения передач на плоскости (M,ω)

Линия ABED соответствует уравнению (5) и представляет собой отображение линии переключения передач $L_1 L\, L_2$ (рис. 5) при работе транспортного средства на 2 передаче. Соответственно область ABEDFJ – это область режимов двигателя, при которых необходимо использовать 2 передачу. Аналогично линия HGK представляет собой линию переключения передач при работе ТС на 1 передаче, а область ACFKGH – область допустимых режимов при использовании 1 передачи. Каждой точке N_1 линии переключения GK соответствует точка N_2 линии BE, лежащая на гиперболе равных мощностей $(M,\omega) = \text{const}$, проходящей через точку N_1.

С помощью линии переключения, перестроенной в координаты (M, ω), можно рекомендовать алгоритм переключения передач, обеспечивающий минимальный расход топлива. Этот алгоритм с равным успехом может быть использован как при ручном, так и при автоматическом переключении передач. Суть алгоритма заключается в переключении передач с 1 на 2 при переходе линии GK в направлении S_1 (рис. 6) и в обратном переключении при переходе линии BE в направлении S_2.

Заключение. Предложенный в статье метод поиска лучшего по экономичности значения из двух возможных передаточных чисел трансмиссии можно распространить на более общую задачу – выбора значения передаточного числа из всего допустимого дискретного набора.

Алгоритм переключения передач, основанный на предложенном методе, ориентирован, прежде всего, на автоматическое переключение передач, а также может быть положен в основу подсказывающей системы при ручном управлении механической коробкой передач автомобиля.

Список літератури

1. Крутов В. И. *Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания*. Москва: Машиностроение, 1968. 535 с.
2. Айзерман М. А. *Теория автоматического регулирования двигателей*. Москва: Гостеориздат, 1952. 510 с.
3. Антонов А. С. *Силовые передачи колесных и гусеничных машин. Теория и расчет*. Москва: Машиностроение, 1976. 477 с.
4. Филькин Н. М., Шаихов Р. Ф., Буянов И. П. *Основы теории исследования эксплуатационных свойств автомобиля*. Пермь: Пермская ГСХА, 2016. 241 с.
5. Кондрашкин А. С. Умняшкин В. А., Филькин Н. М. Оптимизация законов переключения передач. *Автомобильная промышленность*. 1988. № 10. С. 19–20.
6. Кондрашкин А. С., Филькин Н. М. Расчет оптимальных моментов переключения передач при разгоне. *ЭВМ в исследованиях работы АТС. Межвузовский сборник научных трудов*. Москва: МИП. 1988. С. 45–48.
7. Павленко А. В. Метод определения ряда передаточных чисел трансмиссии на ранних этапах проектирования. *Сборник научных трудов ХНАДУ*. 2001. Вып. 7–8. С. 100–102.
8. Павловский В. Е., Огольцов В. Н., Огольцов Н. С. Система управления нижнего уровня для автомобиля с механической трансмиссией. *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша*. 2013. № 103. 28 с.
9. Сахно В. П. Корнач А. А. Определение передаточных чисел трансмиссии при условии минимального расхода топлива в установившемся движении автомобиля. *Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки»*. Киев: НТУ. 2015. Вып. 1(31). С. 469–475.
10. Красневский Л. Г. Автоматические трансмиссии как средство повышения энергоэффективности силовых установок мобильных машин. *Перспективные материалы и технологии: сборник материалов международного симпозиума*. Витебск: УО «ВГТУ», 2015. С. 125–129.
11. Кузнецов А. Г. Анализ возможности работы двигателя с минимальным расходом топлива. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение.* 2015. № 7. С. 52–57.
12. Леонов И. В. Алгоритм управления экономичностью силового агрегата с дизельным двигателем. *Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. Машиностроение.* 2018. № 1. С. 83–91.
13. Стечкин Б. С. *Теория тепловых двигателей. Избранные труды*. Москва: Наука, 1977. 410 с.

References (transliterated)

1. Krutov V. I. *Avtomaticheskoe regulirovanie dvigatelej vnutrennego sgoranija* [Automatic control of internal combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 535 p.
2. Aizerman M. A. *Teorija avtomaticheskogo regulirovanija dvigatelej* [Theory of automatic regulation of engines]. Moscow, Gosteorizdat Publ., 1952. 510 p.

3. Antonov A. S. *Silovye peredachi kolesnyh i gusenichnyh mashin. Teorija i raschet* [Power transmission of wheeled and tracked vehicles. Theory and calculation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 477 p.
4. Filkin N. M., Shaikhov R. F., Buyanov I. P. *Osnovy teorii issledovanija jekspluatacionnyh svojstv avtomobilja* [Fundamentals of the theory of the study of operational properties of a car]. Perm, Perm State Agricultural Academy Publ., 2016. 241 p.
5. Kondrashkin A. S. Umnyashkin V. A., Filkin N. M. Optimizacija zakonov perekljuchenija peredach [Optimization of the laws of gear shifting]. *Avtomobil'naja promyshlennost'*. 1988, vol. 10, pp. 19–20.
6. Kondrashkin A. S., Filkin N. M. Paschet optimal'nyh momentov perekljuchenija peredach pri razgone [Calculation of the optimal moments of gear shifting during acceleration]. *EVM v issledovaniiakh raboty ATS. Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov* [Computers in the study of the operation of automatic telephone exchanges. Interuniversity collection of scientific papers]. Moscow, MIP Publ., 1988, pp. 45–48.
7. Pavlenko A. V. Metod opredelenija rjada peredatochnyh chisel transmissii na rannih jetapah proektirovanija [Method for determining a number of transmission ratios at the early stages of design]. *Sbornik nauchnyh trudov* [Collection of scientific papers]. 2001, issue 7–8, pp. 100–102.
8. Pavlovsky V. E., Ogoltsov V. N., Ogoltsov N. S. *Sistema upravlenija nizhnego urovnja dlja avtomobilja s mehanicheskoj transmissiej* [Lower level control system for a car with a mechanical transmission]. KIAM Preprints M. V. Keldysh Publ., 2013, vol. 103, 28 p.
9. Sakhno V. P. Kornach A. A. Opredelenie peredatochnyh chisel transmissii pri uslovii minimal'nogo rashoda topliva v ustanovivshemsja dvizhenii avtomobilja [Determination of gear ratios of a transmission under the condition of minimum fuel consumption in steady-state vehicle movement]. *Vestnik Nacional'nogo transportnogo universiteta. Serija "Tehnicheskie nauki"* [Bulletin of the National Transport University. Series "Engineering"]. Kiev, NTU Publ., 2015, issue 1 (31), pp. 469-475.
10. Krasnevsky L. G. Avtomaticheskie transmissii kak sredstvo povyshenija jenergojeffektivnosti silovyh ustanovok mobil'nyh mashin [Automatic transmissions of kA means of increasing the energy efficiency of power plants of mobile machines]. *Perspektivnye materialy i tehnologii: sbornik materialov mezhdunarodnogo simpoziuma* [Advanced Materials and Technologies: a collection of the international symposium materials]. Vitebsk, *UO "VGTU"*, 2015, pp. 125–129.
11. Kuznetsov A. G. Analiz vozmozhnosti raboty dvigatelja s minimal'nym rashodom topliva [Analysis of engine operation with minimum fuel consumption]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering]. 2015, no. 7, pp. 52–57.
12. Leonov I. V. Algoritm upravlenija jekonom ichnost'ju silovogo agregata s dizel'nym dvigatelem [The algorithm for controlling the efficiency of a power unit with a diesel engine]. *Vestnik MGTU im. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of MSTU. Bauman. Ser. Mechanical engineering]. Moskow, 2018, no. 1, pp. 83–91.
13. Stechkin B. S. *Teorija teplovyh dvigatelej. Izbrannye trudy* [Theory of heat engines. Selected Works]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 410 p.

Поступила (received) 05.04.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Куценко Олександр Сергійович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-6059-3694; e-mail: kuzenko@kpi.kharkov.ua.

Коваленко Сергій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-8763-0862; e-mail: adbc@ukr.net.

Куценко Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0001-6059-3694; e-mail: kuzenko@kpi.kharkov.ua.

Коваленко Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0001-8763-0862; e-mail: adbc@ukr.net.

Kutsenko Oleksandr Sergiyovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6059-3694; e-mail: kuzenko@kpi.kharkov.ua..

Kovalenko Serhii Volodymyrovich – PhD, Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8763-0862; e-mail: adbc@ukr.net.

УДК 681.5 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.09**

О. О. БІЛОБОРОДОВ

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ СКАНУВАЛЬНОЮ АНТЕННОЮ СИСТЕМОЮ

На основі методу структурних схем синтезована система управління сканувальною антенною системою, яка являє собою частковий випадок слідкуючої системи, що на основі заданих координат регулює розузгодження між необхідними і поточними значеннями кутів азимуту і місця. Важливою особливістю сканувальних систем є постійний рух виконавчих механізмів під час виконання завдань цільового призначення. Тому нелінійності елементів навігаційної системи можуть призводити до суттєвого погіршення якості виконання завдань сканування. У роботі обґрунтовано структурну схему сканування за одним каналом, визначено її математичний опис. На першому етапі було проведено аналіз стійкості функціонально мінімальної системи. Було визначено необхідність інтегрування схеми з послідовно увімкненим регулятором швидкості пропорційно-інтегрально-диференційної дії і сигналом зворотного зв'язку, що знімається з тахометра на осі двигуна. Проведено моделювання контуру швидкості для аналізу його стійкості і здатності зберігати свої властивості при відхиленні параметрів від розрахункових значень або варіаціях налаштування параметрів регулятора. Було побудовано загальну схему сканувальної системи, до якої було введено нелінійний елемент. У якості нелінійного елемента було обрано спрощену модель волоконно-оптичного гіроскопа з областю нечутливості. З метою перевірки виконання вимог у перехідному та в установленому режимах роботи, а також для оцінки похибки системи при дії на неї реальних впливів було проведено модельний експеримент. Результати моделювання показали високу якість роботи синтезованої системи. Було досліджено похибки регулювання при відсутності нелінійного елемента, а також при його наявності при варіації значення ширини області нечутливості. Визначено, що високі значення ширини області нечутливості можуть призводити до зриву управління, що необхідно враховувати при обґрунтуванні вимог до подібних систем.

Ключові слова: автоматизована система управління, антенна система, сканування, якість управління, нелінійність параметрів, похибки.

О. А. БЕЛОБОРОДОВ

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СКАНИРУЮЩЕЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМОЙ

На основе метода структурных схем синтезирована система управления сканирующей антенной системой, представляющая собой частный случай следящей системы, которая на основе заданных координат регулирует рассогласование между необходимыми и текущими значениями углов азимута и места. Важной особенностью сканирующих систем является постоянное движение исполнительных механизмов при выполнении задач целевого назначения. Поэтому нелинейности элементов навигационной системы могут приводить к существенному ухудшению качества выполнения задач сканирования. В статье обоснована структурная схема сканирования по одному каналу, определено ее математическое описание. На первом этапе был проведен анализ устойчивости функционально минимальной системы. Была определена необходимость интегрирования схемы с последовательно включенным регулятором скорости пропорционально-интегрально-дифференциального действия и сигналом обратной связи, снимаемого с тахометра на оси двигателя. Проведено моделирование контура скорости для анализа его устойчивости и способности сохранять свои свойства при отклонении параметров от расчетных значений или вариациях настройки параметров регулятора. Было построено общую схему сканирующей системы, в которую был внедрен нелинейный элемент. В качестве нелинейного элемента была выбрана упрощенная модель волоконно-оптического гироскопа с областью нечувствительности. С целью проверки выполнения требований в переходном и в установленном режимах работы, а также для оценки погрешности системы при воздействии на нее реальных воздействий был проведен модельный эксперимент. Результаты моделирования показали высокое качество работы синтезированной системы. Были исследованы погрешности регулирования при отсутствии нелинейного элемента, а также при его наличии при вариации значения ширины области нечувствительности. Определено, что высокие значения ширины области нечувствительности могут приводить к срыву управления, что необходимо учитывать при обосновании требований к подобным системам.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, антенная система, сканирование, качество управления, нелинейность параметров, ошибки.

O. O. BILOBORODOV

AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF THE SCAN ANTENNA SYSTEM

Based on the method of structural schemes, the control system of the scanning antenna system is synthesized, which is a special case of the tracking system, which, based on the given coordinates, controls the mismatch between the necessary and current values of the azimuth and elevation angles. An important feature of scanning systems is the constant movement of actuators when performing tasks of the intended purpose. Therefore, the nonlinearity of the elements of the navigation system can lead to a significant deterioration in the quality of the scan tasks. The article substantiates the block diagram of scanning on one channel, its mathematical description is determined. At the first stage, an analysis of the stability of a functionally minimal system was carried out. The need was identified for integrating the circuit with a sequentially connected speed controller of proportional-integral-differential action and a feedback signal taken from the tachometer on the axis of the engine. The speed loop was modeled to analyze its stability and ability to maintain its properties when the parameters deviate from the calculated values or the controller parameter settings are varied. A general scheme of the scanning system was built into which a nonlinear element was introduced. As a nonlinear element, a simplified model of a fiber-optic gyroscope with a deadband was chosen. In order to verify compliance with the requirements in transitional and established operating modes, as well as to evaluate the error of the system when exposed to real effects, a model experiment was conducted. The simulation results showed the high quality of the synthesized system. The control errors were investigated in the absence of a nonlinear element, as well as in its presence with a variation in the value of the width of the deadband. It is determined that high values of the width of the dead zone can lead to a breakdown of control, which must be taken into account when substantiating the requirements for such systems.

Keywords: automated control system, antenna system, scanning, control quality, non-linearity of parameters, errors

Вступ. Дослідження різної природи часто проводяться методом спостереження визначених об'єктів. У випадку, коли технічне поле зору засобів спостереження не можуть повністю охопити об'єкт дослідження, найпростішим шляхом виконання завдання часто виступає спосіб послідовного спостереження різних частин досліджуваного об'єкта [1]. Іншими словами здійснюється сканування певної

© О. О. Білобородов, 2020

області, яка утримує досліджуваний об'єкт (об'єкти). Для подальшого відтворення протяжного об'єкта виникає завдання постійного регулювання (оцінювання поточного положення і подальша зміна) напряму осі відповідного технічного засобу. Подібні завдання виникають також при впливі на об'єкт фізичними факторами (лазерним або радіочастотним випромінюванням тощо) [2]. Якщо сканувальний технічний засіб спостереження (або впливу) знаходиться на рухомій платформі, то система управління наведенням такого засобу повинна враховувати як характеристики руху, так і закон сканування.

Поширеним випадком зазначених систем є сканувальна антенна система [3], функціональна схема якої наведена на рис. 1. Вона являє собою частковий випадок слідкуючої системи, яка на основі заданих координат регулює розузгодження між необхідними і поточними значеннями кутів азимуту і місця. Значення кутових координат можуть отримуватись від різних навігаційних систем (мікромеханічних, гіроскопічних, радіонавігаційних або інших). Важливою особливістю сканувальних систем є постійний рух виконавчих механізмів під час виконання завдань цільового призначення. Тому нелінійності елементів навігаційної системи можуть призводити до суттєвого погіршення якості виконання завдань сканування і потребують дослідження.



Рис. 1. Функціональна схема сканувальної системи

Аналіз останніх досліджень. В останніх дослідженнях і публікаціях означена проблема вивчається з точки зору наведення маневрених апаратів [4]. Для детермінованого руху пропонуються алгоритми прогнозу вектору осі наведення на основі методу кватеріонів з подальшим визначенням необхідної кутової швидкості на основі вирішення кінематичного рівняння [5]. Порівняльний аналіз математичних додатків [6] свідчить про можливість ефективного урахування нелінійностей складових елементів систем управління [7].

Мета статті. Враховуючи зазначене, метою статті є здійснити синтез регуляторів сканувальної системи, моделювання і перевірка здатності системи зберігати показники якості при відхилені від розрахункових значень параметрів, а також дослідження послаблення якості сканування від впливу нелінійностей навігаційної системи.

Побудова структурної схеми. Пристрій визначення розузгодження сканувальної системи визначає відхилення напряму осі антенної системи від мінливого напряму на необхідний осередок району сканування і перетворює це відхилення у сигнали управління U_θ і U_φ, пропорційні сигналам розузгодження відхилень за азимутом і за кутом місця:

$$U_\theta = K_\theta(\theta_0 - \theta),\ U_\varphi = K_\varphi(\varphi_0 - \varphi), \qquad (1)$$

де K_θ, K_φ – коефіцієнти пропорційності.

Сигнали U_θ і U_φ поступають на виконавчі пристрої, що змінюють кутове положення антени так, щоб похибки сканування за азимутом $(\theta_0 - \theta)$ і за кутом місця $(\varphi_0 - \varphi)$ не перевищували заданих тактико-технічних вимог. Будемо вважати виконавчі пристрої незалежними.

Джерелом задаючого впливу виступає як недетермінований рух носія, так і детермінований закон сканування (із відповідними похибками визначення положення носія, його орієнтування, а також похибками наведення антенної системи).

Структурна схема сканування за азимутом наведена на рис. 2 (аналогічно будується схема сканування на кутом місця). Вона побудована за схемою електромашинний підсилювач – двигун постійного струму з тахометричним зворотним зв'язком.

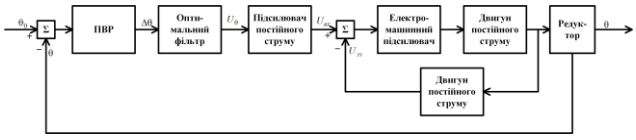


Рис. 2. Структурна схема сканувальної системи за азимутом

Математичний опис відношення змінних при їх взаємодії у системі і з зовнішнім середовищем наведений на рис. 3.

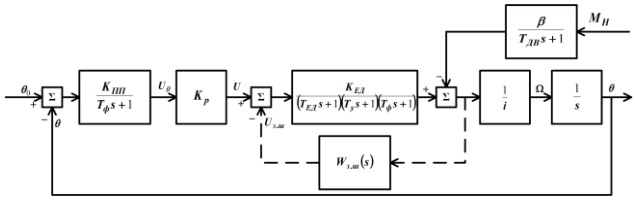


Рис. 3. Структурна схема математичної моделі сканувальної системи

Синтез системи управління сканувальної антенної системи. Для синтезу сканувальної системи скористуємося методом структурних схем.

У якості основних вимог до сканувальної системи було визначено точність (максимальне відхилення кутової координати) δ_{max} – не більше 10 кутових хвилин, швидкість сканування Ω_{max} – до 30 град/с, кутове прискорення ε_{max} – до 0,5 рад/с^2. Інші дані було обрано з точки зору попереднього дослідження досяжних характеристик сучасної техніки [8; 9].

На першому етапі для визначених початкових даних було проведено аналіз стійкості функціонально мінімальної системи [10]. Тобто визначалося, чи здатна система працювати без корегуючих ланцюгів.

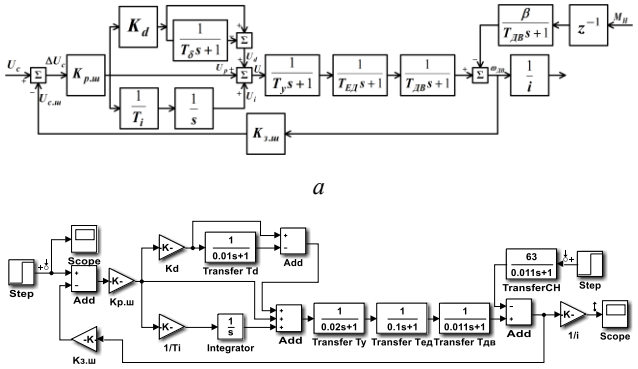
За результатами було визначено, що сума постійних часу значно перевищує допустиме значення, а логарифмічна амплітудна характеристика не досягала необхідного значення добротності.

З метою зниження чутливості системи до зовнішніх збурень і варіації параметрів окремих елементів, підвищення швидкодії і плавності руху для

синтезу контуру швидкості було обрано схему з послідовно увімкненим регулятором швидкості пропорційно-інтегрально-диференційної дії і сигналом зворотного зв'язку, що знімається з тахометра на осі двигуна [11].

Для забезпечення високої точності відтворення вхідних впливів при збереженні достатніх умов стійкості було синтезовано бажану передатну функцію і обчислені її параметри.

Після розрахунку параметрів контуру швидкості було проведено моделювання [12] (рис. 4) для аналізу стійкості і здатності контуру зберігати свої властивості при відхиленні параметрів від розрахункових значень або варіаціях налаштування параметрів регулятора.



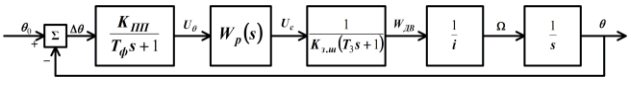
а

б

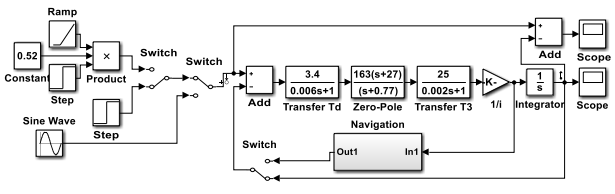
Рис. 4. Схема контуру швидкості сканувальної системи:
а – математична; *б* – модельна

Моделювання проводилось у додатку Simulink середовища MATLAB. Для різних сполучень постійних часу (із відхиленнями до 50%) отримувались графіки реакції кутової швидкості двигуна на збурення вигляду $1(t)$ та визначалися: час установлення, час перехідного процесу і перерегулювання. За результатами аналізу отриманих даних було зроблено висновок про чутливість контуру і його стійкість.

Далі було побудовано загальну схему сканувальної системи (рис. 5), до якої було введено нелінійний елемент (з можливістю переключення для порівняльного аналізу). У якості нелінійного елемента на даному етапі досліджень було обрано спрощену модель волоконно-оптичного гіроскопа з областю нечутливості (рис. 6).



а



б

Рис. 5. Схема сканувальної системи:
а – математична; *б* – модельна

У реальному випадку введення нелінійності означає, що об'єкт управління стає неповністю спостережним. З метою перевірки виконання вимог у перехідному та в установленому режимах роботи, а також для оцінки похибки системи при дії на неї реальних впливів було проведено модельний експеримент.

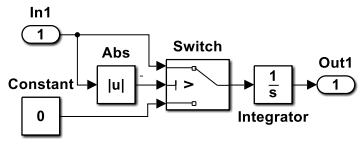
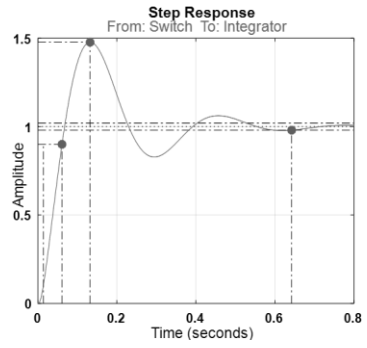
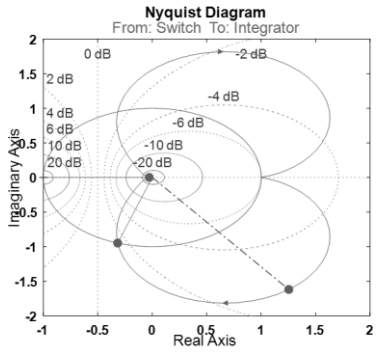


Рис. 6. Підсистема Navigation: модель датчика кутів з областю нечутливості

На першому етапі модельного експерименту було проведено лінеаризацію та досліджувалися час установлення, перерегулювання, а також час перехідного процесу. Результати моделювання показали, що показники задовольняють заданим вимогам (рис. 7, *а*). Дослідження стійкості здійснювалося за діаграмою Найквіста. Результати показали достатній запас стійкості синтезованої системи (рис. 7, *б*).



а



б

Рис. 7. Результати дослідження характеристик системи:
а – перехідні характеристики; *б* – характеристики стійкості

Після увімкнення нелінійного елемента система не підлягає лінеаризації. Тому подальші дослідження проводились шляхом порівняння похибок системи з увімкненим та вимкненим нелінійним елементом. Розглядались два варіанти значення ширини області нечутливості нелінійного елемента (один з варіантів у 5 разів гірший за інший).

Дослідження перехідних процесів проводилось шляхом аналізу похибок реакції на вплив вигляду $1(t)$.

Аналіз результатів (рис. 8) показав виконання заданих вимог щодо тривалості перехідних процесів та величини перерегулювання для невеликих значень ширини області нечутливості нелінійного елемента. При значних нелінійностях виявлено зрив процесу управління.

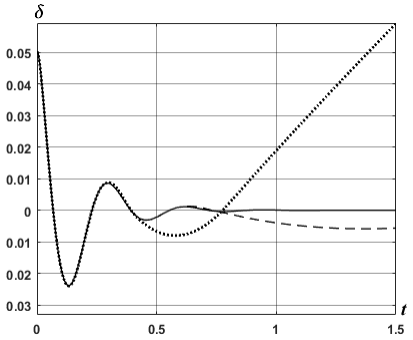


Рис. 8. Результати дослідження похибок перехідних процесів:
— без нелінійності; - - - помірна нелінійність; ···· суттєва нелінійність

Також було перевірено похибку у граничних режимах роботи при вхідному впливі на максимальній швидкості $\theta_0(t) = \Omega_{\max} t \cdot 1(t)$. Аналіз результатів (рис. 9) показав високу точність сканування та несуттєвий вплив величини нелінійності на якість процесу управління.

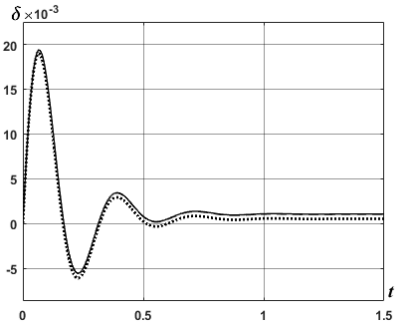


Рис. 9. Результати дослідження похибок сканування на максимальній швидкості:
— без нелінійності; - - - помірна нелінійність; ···· суттєва нелінійність

Для дослідження можливостей реальної роботи був промодельований випадок колового сканування у граничних режимах, що для одного каналу являє гармонійний вплив $\theta_0(t) = A_{\max} \sin \omega_к t$, якому відповідає максимальна швидкість $\Omega_{\max} = \omega_к A_{\max}$ і максимальне прискорення $\varepsilon_{\max} = \omega_к^2 A_{\max}$. Параметри еквівалентного впливу:

$$A_{\max} = \frac{\Omega_{\max}^2}{\varepsilon_{\max}} \text{ і } \omega_к = \frac{\varepsilon_{\max}}{\Omega_{\max}}. \qquad (2)$$

Аналіз результатів (рис. 9) показав придатну якість синтезованої системи управління сканувальною антенною системою, але при великих значеннях ширини області нечутливості нелінійного елемента похибки не відповідають заданим вимогам.

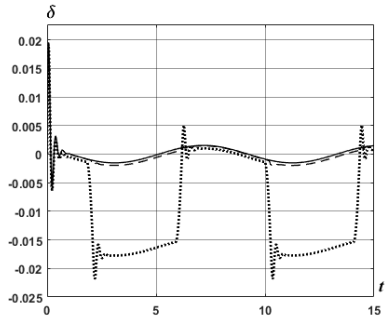


Рис. 9. Результати дослідження похибок сканування у граничних режимах:
— без нелінійності; - - - помірна нелінійність; ···· суттєва нелінійність

Висновки. Таким чином, у дослідженні синтезовано систему управління сканувальною антенною системою. Проведено програмне моделювання і здійснено перевірку здатності системи зберігати показники якості при відхилені від розрахункових значень параметрів. Досліджено залежність якості сканування від впливу нелінійностей навігаційної системи.

Отримані результати підтверджують важливість врахування параметрів нелінійних елементів під час конструювання високоточних систем. Також слід враховувати високу вартість навігаційних систем з низькими значеннями ширини області нечутливості.

Напрямками подальших досліджень можна визначити розширення моделі нелінійностей на інші елементи, врахування інших похибок, які не розглядались у даній статті, а також дослідження взаємного впливу каналів один на одного.

Список літератури

1. Zhang Y., Fu Y., Wang H., Li H., Pan S., Du Y. Two-dimensional environment reconstruction based on absolute local deflection angle of laser scanning data. *Оптический журнал*. 2019. № 86. С. 46–51.
2. Zhang H., Shi Y., Xu C. Y., Kutsuna M. Surface hardening of gears by laser beam processing. *Surface Engineering*. 2003. Vol. 19, no. 2. P. 134–136.
3. Кудин В. П. Сканирующая антенная система диапазона коротких волн. *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Сер.: Естественные науки*, 2017. № 6. С. 139–144.
4. *Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов* / ред.: Красильщиков М. Н., Себряков Г. Г. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 556 с.
5. Федулов Р. В., Шишкин А. С. Наведение оптической аппаратуры малого космического аппарата дистанционного зондирования. *Вестник томского государственного университета: Математика и механика*. 2013. № 22. С. 97–104.
6. Митришкин Ю. В., Джумакаев Т. К., Коренев П. С. Имитационное моделирование систем управления плазмой в токамаке со стендом реального времени. *Труды 7-й Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». Т. 2*. Москва: ИПУ РАН, 2015. С. 224–229.
7. Чернов А. В., Семёнов А. В. Математическая модель следящих систем с учетом нелинейностей переменных состояния. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей»*. 2017. № 1 , С. 88–97.
8. Шрейнер Р. Т. *Системы подчиненного регулирования электроприводов. Ч. 1. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат*. Екатеринбург: Изд. УГППУ, 1997. 279 с.
9. *Электропривод: Учебное пособие* / ред.: С. В. Петухов, М. В. Кришьянис. Архангельск: С(А)ФУ, 2015. 303 с.

10. Бесекерский В. А. *Динамический синтез систем автоматического регулирования*. Москва: Наука, 1970. 576 с.
11. Семёнов А. В., Макарчук А. В. Математическая модель заданной части электромеханической следящей системы с учетом ограничений. *Мат. Всерос. науч. конф. «Теоретические и методические проблемы эффективного функционирования радиотехнических систем»*. Таганрог, 2013. С. 37–46.
12. *Автоматические системы управления в среде Matlab-Simulink: методические указания к выполнению лабораторных работ* / ред.: В. С. Щербаков, А. А. Руппель, И. В. Лазута, С. А. Милюшенко. Омск: СибАДИ, 2010. 49 с.

References (transliterated)

1. Zhang Y., Fu Y., Wang H., Li H., Pan S., Du Y. Restoration of the spatial environment during two-dimensional laser scanning using data on the absolute value of the local deviation angle. *Optical magazine*. 2019, no. 86, pp. 46–51.
2. Zhang H., Shi Y., Xu C. Y., Kutsuna M. Surface hardening of gears by laser beam processing. *Surface Engineering*. 2003, vol. 19, no. 2, pp. 134–136.
3. Kudin V. P. Skanirujushhaja antennaja sistema diapazona korotkih voln [Short Range Scanning Antenna System]. *Izvestija Gomelskogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny. Ser.: Estestvennye nauki* [News of the Gomel State University named after F. Skorina. Series: Natural Science]. 2017, no. 6, pp. 139–144.
4. *Sovremennye informacionnye tehnologii v zadachah navigacii i navedenija bespilotnyh manevrennyh letatelnyh apparatov* [Modern information technologies in the problems of navigation and guidance of unmanned maneuverable aircraft] / editors: M. N. Krasylshchykov, G. G. Sebrjakov. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009. 556 p.
5. Fedulov R. V., Shishkin A. S. Navedenie opticheskoj apparatury malogo kosmicheskogo apparata distancionnogo zondirovanija [Guidance of the optical equipment of a small spacecraft remote sensing]. *Vestnik tomskogo gosudarstvennogo universiteta: Matematika i mehanika* [Bulletin of Tomsk State University: Mathematics and Mechanics]. 2013, no. 22, pp. 97–104.
6. Mitrishkin J. V., Dzhumakaev T. K., Korenev P. S. Imitacionnoe modelirovanie sistem upravlenija plazmoj v tokamake so stendom realnogo vremeni [Simulation of plasma control systems in a tokamak with a real-time stand]. *Trudy 7-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i praktika", t. 2* [Proceedings of the 7th All-Russian Scientific and Practical Conference "Simulation. Theory and practice", vol. 2]. Moscow, IPU RAN Publ., 2015, pp. 224–229.
7. Chernov A. V., Semjonov A. V. Matematicheskaja model sledjashhih sistem s uchetom nelinejnostej peremennyh sostojanija [A mathematical model of tracking systems taking into account the nonlinearities of state variables]. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz-Antej"* [Bulletin of the Concern "Almaz-Antey"]. 2017, no. 1, pp. 88–97.
8. Shrejner R. T. *Sistemy podchinennogo regulirovanija elektroprivodov. Ch. 1. Elektroprivody postojannogo toka s podchinennym regulirovaniem koordinat* [Systems of subordinate regulation of electric drives. Part 1. Electric drives of direct current with subordinate regulation of coordinates]. Yekaterinburg, UGPPU Publ., 1997. 279 p.
9. *Elektroprivod: Uchebnoe posobie* [Electric Drive: Tutorial] / ed. S. V. Petuhov, M. V. Krishjanis. Arhangelsk, S(A)FU Publ., 2015. 303 p.
10. Besekerskij V. A. *Dinamicheskij sintez sistem avtomaticheskogo regulirovanija* [Dynamic synthesis of automatic control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 576 p.
11. Semjonov A. V., Makarchuk A. V. Matematicheskaja model zadannoj chasti elektromehanicheskoj sledjashchej sistemy s uchetom ogranichenij [A mathematical model of a given part of an electromechanical tracking system, taking into account the limitations]. *Mat. Vseros. nauch. konf. "Teoreticheskie i metodicheskie problemy jeffektivnogo funkcionirovanija radiotehnicheskih sistem"* [All-Russian Mathematical Scientific Conference "Theoretical and Methodological Problems of the Effective Functioning of Radio Engineering Systems"]. Taganrog, 2013, pp. 37–46.
12. *Avtomaticheskie sistemy upravlenija v srede Matlab-Simulink: metodicheskie ukazanija k vypolneniju laboratornyh rabot* [Automated control systems in the environment of Matlab-Simulink: guidelines for laboratory work] / ed. V. S. Shcherbakov, A. A. Ruppel, I. V. Lazuta, S. A. Miljushenko. Omsk: SibADI Publ., 2010. 49 p.

Надійшла (received) 11.05.2020

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

Білобородов Олег Олександрович – кандидат технічних наук, військова частина А4566, докторант; м. Київ, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3166-2659; e-mail: 22bredly@gmail.com

Белобородов Олег Александрович – кандидат технических наук, воинская часть А4566, докторант; г. Киев, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3166-2659; e-mail: 22bredly@gmail.com

Biloborodov Oleh Olexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Military unit A4566, doctoral student; Kyiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3166-2659; e-mail: 22bredly@gmail.com

УПРАВЛІННЯ В ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS

UDC 004.02 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.10**

A. A. SUMSKII, Y. S. LITVINOVA

QUANTITIVE RISK ANALISYS OF IT-STARTUPS

When working with an IT startup, a young developer will always encounter difficulties in analyzing risks. Since there are quite a few options and methods for analysis, it was decided to investigate some of the most effective methods of risk analysis. Also, the implementation of a startup, as a rule, is based on attracting external financing. But more often than not, the investor is interested not only how effective this project is in case of its successful implementation, but also what is the likelihood of a positive effect, that is, how much all risk factors capable of influencing the project are taken into account. So, one more confirmation of the relevance of the application of risk analysis is help in finding sources of project financing. The aim of the study is to analyze possible methods for quantitative risk analysis of an IT startup, with consideration of the most practical methods for solving risk analysis tasks. The advantages of a qualitative risk assessment are the ease of understanding and implementation, the ability to rank risks using characteristics or color codes. Outwardly, the methodology for a qualitative assessment of project risks seems very simple – descriptive, but in essence it should lead the analyst to a quantitative result, that is, a valuation of the identified risks, their negative consequences and stabilization measures. In the process of research, we consider: the method of reliable equivalents, the scenario method, sensitivity analysis, and the Monte Carlo method. The goal as a result is to simplify the risk analysis for IT startups, as well as to achieve maximum efficiency and understanding the degree of influence of risks on IT startups for their further elimination or mitigation.

Keywords: IT-startup, quantitative risk analysis, model, analysis of the sensitivity, scripting method, imitation model.

А. О. СУМСЬКИЙ, Ю. С. ЛІТВІНОВА

КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ РИЗИКІВ IT-СТАРТАПІВ

При роботі з IT-стартапом молодий розробник завжди зіткнеться з труднощами при аналізі ризиків. Оскільки варіантів і методів для аналізу існує досить багато, було прийнято рішення досліджувати деякі з найбільш ефективних методів аналізу ризиків. Також реалізація стартапу, як правило, заснована на залученні зовнішнього фінансування. Але найчастіше інвестору цікаво не тільки, наскільки ефективний цей проект в разі його успішної реалізації, а й наскільки ймовірним є отримання позитивного ефекту, тобто наскільки враховані всі ризикові чинники здатні вплинути на проект. Так, ще одним підтвердженням актуальності застосування ризик-аналізу стає допомогу в пошуку джерел фінансування проекту. Метою дослідження є аналіз можливих методів кількісного аналізу ризиків IT-стартапу, з розглядом найбільш практичних методів для вирішення завдань з аналізу ризиків. Достоїнствами якісної оцінки ризиків є простота розуміння і реалізації, можливість ранжирування ризиків з використанням характеристик або колірних позначень. Методика якісної оцінки ризиків проекту зовні представляється дуже простий – описової, але по суті вона повинна привести аналітика до кількісного результату, тобто вартісній оцінці виявлених ризиків, їх негативних наслідків і стабілізаційних заходів. У процесі дослідження розглянемо: метод достовірних еквівалентів, метод сценаріїв, аналіз чутливості та метод Монте Карло. Завдання в результаті спростити аналіз ризиків для IT-стартапів, а також досягти максимальної ефективності та розуміння ступіня впливу ризиків на IT-стартап для їх подальшого усунення, або пом'якшення.

Ключові слова: IT-стартап, кількісний аналіз ризиків, модель, аналіз чутливості, метод сценаріїв, імітаційне моделювання.

А. А. СУМСКОЙ, Ю. С. ЛИТВИНОВА

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РИСКОВ IT-СТАРТАПОВ

При работе с IT-стартапом молодой разработчик всегда столкнется с трудностями при анализе рисков. Поскольку вариантов и методов для анализа существует довольно много, было принято решение исследовать некоторые из самых эффективных методов анализа рисков. Также реализация стартапа, как правило, основана на привлечении внешнего финансирования. Но чаще всего инвестору интересно не только, насколько эффективен этот проект, в случае его успешной реализации, но и какова вероятность получения положительного эффекта, то есть насколько учтены все рисковые факторы способные повлиять на проект. Так, еще одним подтверждением актуальности применения риск-анализа становится помощь в поиске источников финансирования проекта. Целью исследования является анализ возможных методов количественного анализа рисков IT-стартапа, с рассмотрением наиболее практичных методов для решения задач по анализу рисков. Достоинствами качественной оценки рисков является простота понимания и реализации, возможность ранжирования рисков с использованием характеристик или цветовых обозначений. Методика качественной оценки рисков проекта внешне представляется очень простой – описательной, но по сути она должна привести аналитика к количественному результату, то есть стоимостной оценке выявленных рисков, их негативных последствий и стабилизационных мер. В процессе исследования рассмотрим: метод достоверных эквивалентов, метод сценариев, анализ чувствительности и метод Монте Карло. Задача в результате упростить анализ рисков для IT-стартапов, а также достичь максимальной эффективности и понимания степени влияния рисков на IT-стартап для их дальнейшего устранения или смягчения

Ключевые слова: IT-стартап, количественный анализ рисков, модель, анализ чувствительности, метод сценариев, имитационное моделирование.

© A. A. Sumskii, Y. S. Litvinova, 2020

Introduction. The process of rapid development of technologies and methods of approach to the creation and implementation of these innovative ideas is also changing. However, despite the time and change, one thing will always remain when dealing with something new, namely the risks.

When creating something new, unknown to anyone, the risks involved in creating and entering a large market will always be relevant. However, the methods and approaches to addressing these issues will change on this subject will devote this article. The question of risk analysis is expanding every year and young startupers are faced with it. The numbers of methods are so large, and it becomes difficult to choose some methods to achieve the maximum result. There are also problems with the calculation and determination of the importance of risks. In this article, we focus only on quantitative analysis methods. Quantitative analysis methods are also a decent amount. That is why we will focus on the main methods that will lead the developer or analyst to the maximum result.

The main goal of this work is to analyze the optimal quantitative methods of risk analysis. This in result will lead to facilitating the promotion of a future product, and reducing the likelihood of risk. That is, the correct approach to calculations and the choice of methods is almost a half-successful startup.

There are also several different methods for quantifying risk. Risk can be accounted for in two ways: increasing the discount rate on the riskiness of a project or by reducing the value of full cash flows.

The discount rate implies marginal (minimum acceptable) profitability or alternative costs of raising capital (alternative cost of capital). In the absence of risk factors for the project, the yield on government bonds is used in practice as such alternative investment. The riskier, the project, the higher the requirements for its profitability. In calculations, these requirements are reflected by increasing the discount rate, so when evaluating project performance, there is a question of justifying the discount rate.

Consider one of the most common methods of adjusting your discount rate:

CAPM – Capital Assets Pricing Model

Foreign risk accounting is also used to determine the risk adjustment CAPM (Capital Asset Pricing Model):

$$E(R_i) = R_f + \beta\big(E(R_m) - R_f\big), \qquad i = 1, \dots, N,$$

where R_i – expected return on the stock market;

R_i – risk-free rate (risk-free return on investment);

R_m – average market profitability (risky assets);

$\big(E(R_m) - R_f\big)$ – Equity Risk Premium;

β – a measure of systematic risk (a factor that reflects the sensitivity of the stock firm's fluctuation to the fluctuation of the stock of all firms in the industry) [1].

The problem with this model for assessing risky projects is that it only takes into account market risks. Also the problem of using a method to evaluate startup projects is the difficulty of determining an industry indicator β.

N. Jensen developed a modification of this formula:

$$R_e = R_f + \beta\big(R_m - R_f\big) + \alpha + \varepsilon,$$

where α – the part of the risk premium that depends on the rating of the firm and the qualifications of the managers;

ε – the part of the risk premium that reflects non-systematic risk (figure up related to fluctuations in market prices for resources, yields of securities) [2].

These methods are not uniform, but they are considered to be the most appropriate to determine the risk rate of a new company and do not require a retrospective assessment.

To account for cash flow risks, we consider two more methods:

1. The method of reliable equivalents:

In applying this method, risk accounting is based on the mathematical expectation of cash flow for each estimated period:

$$X_{\text{уп}} = \sum_{i=1}^{n} P_{\text{к}} X_{\text{к}},$$

where $X_{\text{уп}}$ – the probability of obtaining the result x_i;

$P_{\text{к}}$– the result of an event or result;

$X_{\text{к}}$ – the number of variants of the results of events.

Probability $X_{\text{уп}}$ reflects the degree of confidence that the full value of the expected cash flow will be received and, in the absence of uncertainty, becomes the downward factor for the cash flow of each project implementation period. The determination of the probability of cash inflows is established, as a rule, by expert judgment [3].

2. The scripting method

Scenario analysis involves consideration of several possible options for project development. The guidelines provide an analysis of the following likely scenarios:

- various forecasts of the general inflation index, price indexes and the internal inflation index (or other characteristic of changes in purchasing power) of foreign currency;
- change of tax system;
- different climatic conditions of the project implementation;
- the emergence of competing cheaper products or technologies in the market;
- reinforcement of various rules and regulations that require additional costs, etc.

In the simplified version, three possible project development situations need to be simulated: optimistic (that is, the risk factors did not affect the project), pessimistic (when all risk factors worked), and most likely, then calculating the net present value for each [4]. Then, based on the peer review, the probability of each scenario is determined and the mathematical expectation of the NPV is determined:

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{CIF_t}{(1+IRR)^t} - \sum_{t=1}^{n} \frac{COF_t}{(1+IRR)^t} = 0,$$

where IPR – internal rate of return. A positive indicator NPV is guaranteed if $IPR > r$, in this case, the project is approved for implementation [5].

There are often situations where there is no information about the likelihood of a particular scenario. In solving this problem, the rule is 6 sigma, which uses the

weighted average pessimistic, optimistic and the most probable estimation:

$$tE = \frac{cO+4*cM+cP}{6},$$

where tE – expected cost of the project;

cO – the cost of the project in the implementation of the pessimistic scenario;

cM – project cost in the most likely scenario;

cP – project cost in a pessimistic scenario [6].

3. Analysis of the sensitivity of the project effectiveness

The method of estimating the step of filling in variative parameters on the main indicators of the project's effectiveness, which is the order of the project's rank. The structure of the key parameters of the project (NPV, IRR, PI) shows the most significant factors (for example, sales margin, real value) [7]. The next crock-change of the most critical winter in the international range and analysis of the indicator of efficiency in new minds. The level of correlation between the significant and significant indicators of effectiveness and the degree to which the project will reach the level of success. This assessment carried out severally for the skin factor. Thus, the last estimate of the factors factor is NPV, IRR, PI, and the most recent indicators, so that they can have the greatest impact on the success of the project [8].

With a region of empathy, it's important to win the respect not only by rubbing it when realizing, but by doing it with a positive result, so as if you can significantly overlook negative negligence [9].

For the assessment of the important importance of winter victorious diagram "Tornado" – see fig. 1.

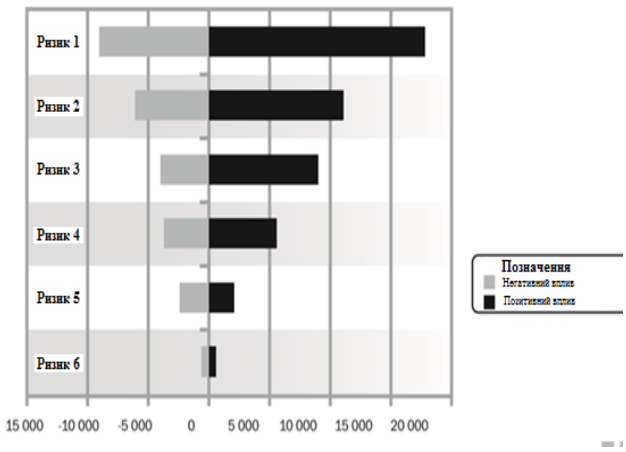


Fig. 1. Tornado Diagram

For the vertical axis, critical parameters are indicated for sensitivity analysis, for the horizontal axis – for the assessment of the norm with the constant value of the parameters [10].

4. Monte Carlo Method (imitation model)

Simulation modeling involves statistical analysis using a large array of data. Unlike considering a limited number of scenarios, the Monte Carlo method investigates all possible combinations, that is, the consideration of the distribution of probable results [11]. Within this method, we create an accurate model (simulation) of the project, based on uncertain parameters, as well as the range of their fluctuations, taking into account the probability distribution. Then, using special application packages, we simulate the values of the given parameters [12]. As a result, we get accurate cash flows with forecast errors. So the Monte Carlo method has three steps: project modeling, Determination of the probability of error in the forecast, selection of forecast error values and cash flow calculation.

Findings. After analyzing the main quantitative methods for evaluating the effectiveness of IT startups, we can conclude that perhaps the most effective methods of this analysis are sensitivity analysis and scenario method. A sensitivity analysis is a good example of a Tornado analysis. As for the scenario method, its use is also very effective in analyzing possible risks. Since when using this method, a series of tests are formed that calculate the state of the project if the risks under consideration nevertheless come true. Closely related to the scenario is method simulation (Monte Carlo method). It is this bunch that gives maximum efficiency in such an analysis. It can be concluded that when evaluating an IT startup, it is also rational to use these methods of quantitative analysis to understand the possible impact of risks on the project and to prevent them.

References

1. Fama E. F., French K. R. The Capital Asset Pricing Model: Theory and Evidence. *Journal of Economic Perspectives*. 2004. Vol. 18, no. 3. P. 25–46. URL: http://www.ssrn.com/link/Chicago-Booth-Fama-Miller-RES.html (accessed 07.08.2019).
2. Сироткин С. А., Кельчевская Н. Р. *Экономическая оценка инвестиционных проектов: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Экономика и управление на предприятиях (по отраслям)»*. Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2017. 311 с.
3. Коссов В. В., Лившиц В. Н., Шахназаров А. Г. и др. *Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция)*. Москва: Экономика, 2000. 421 с.
4. *Алгоритм анализа чувствительности* URL: https://www.masterplans.ru/analiz_chuvstvitelnosti.html (accessed 12.08.2019).
5. *Метод сценариев учета риска проекта*. URL: https://knigi.news/invest/metod-stsenariev-imitatsionnaya-model-otsenki-17406.html (accessed 19.08.2019)
6. Pease Christopher. *An Monte Carlo method* URL: https://towardsdatascience.com/an-overview-of-monte-carlo-methods-675384eb1694 (accessed 10.08.2019)
7. Альварес С. *Как создать продукт, который купят: Метод Lean Customer Development*. Москва: Альпина Паблишер, 2018. 290 с.
8. Derhami S., Smith A. E. An Integer Programming Approach for Fuzzy Rule-Based Classification Systems. *European Journal of Operational Research*. 2017. Vol. 256, issue 3. P. 924–934.
9. Лукаш Ю. А. *Анализ финансовой устойчивости коммерческой организации и пути её повышения: Учебное пособие*. Москва: Флинта, 2012. 282 с.
10. Дегтярева О. И. *Управление рисками в международном бизнесе*. Москва: Флинта, 2014. 380 с.
11. Живетин В. Б. Введение в теорию риска (динамических систем). Москва: Институт проблем риска, ООО Информационно-издательский центр «Бон Анца», 2009. 622 с.
12. Vose D. *Risk analysis: A quantitative guide*. John Wiley & Sons, 2008. 729 p.

References (transliterated)

1. Fama E. F., French K. R. The Capital Asset Pricing Model: Theory and Evidence. *Journal of Economic Perspectives*. 2004, vol. 18, no. 3,

pp. 25–46. Available at: http://www.ssrn.com/link/Chicago-Booth-Fama-Miller-RES.html (accessed 07.08.2019).
2. Sirotkin S. A., Kelchevskaya N. R. Ekonomicheskaya ocenka investicionnyh proektov: uchebnik dlya studentov vuzov, obuchayushchihsya po special'nosti "Ekonomika i upravlenie na predpriyatiyah (po otraslyam)" [Economic evaluation of investment projects: a textbook for university students enrolled in the specialty "Economics and Management at Enterprises (by Industry)"]. Moscow, UNITY-DANA Publ., 2017. 311 p.
3. Kossov V. V., Livshic V. N., Shahnazarov A. G. et al..Metodicheskie rekomendacii po ocenke effektivnosti investicionnyh proektov [Methodological recommendations for assessing the effectiveness of investment projects (second edition)]. Moscow, Ekonomika Publ., 2000. 421 p.
4. *Algoritm analiza chuvstvitelnosti* [Sensitivity analysis algorithm]. Available at: https://www.masterplans.ru/analiz_chuvstvitelnosti.html (accessed 12.08.2019).
5. *Metod scenariev ucheta riska proekta* [The project risk accounting scenario method]. Available at: https://knigi.news/invest/metod-stsenariev-imitatsionnaya-model-otsenki-17406.html (accessed19.08.2019).
6. Pease Christopher. *An Monte Carlo method*. Available at https://towardsdatascience.com/an-overview-of-monte-carlo-methods-675384eb1694 (accessed 10.08.2019).
7. Alvares Sindy. *Lean Customer Development: Building Products Your Customers Will B*uy. O'Reilly Media Publ., 2017. 240 p. (Russ. ed.: Alvares Sindy. Kak sozdat produkt, kotoryj kupyat: Metod Lean Customer Development. Moscow, Alpina Publ., 2018. 290 p.).
8. Derhami S., Smith A.E. An Integer Programming Approach for Fuzzy Rule-Based Classification Systems. *European Journal of Operational Research*. 2017, Vol. 256, issue 3, pp. 924–934.
9. Lukash Y. A. *Analiz finansovoj ustojchivosti kommercheskoj organizacii i puti eyo povysheniya: Uchebnoe posobie* [Analysis of the financial stability of a commercial organization and ways to improve it: Textbook]. Moscow, Flinta Publ., 2017. 280 p.
10. Degtyariova O. I., *Upravlenie riskami v mezhdunarodnom biznese* [Risk management in international business] Moscow: Flinta Publ., 2014. 380 p.
11. Givetin V. B. *Vvedenie v teoriyu riska (dinamicheskih sistem)* [Introduction to risk theory (dynamic systems)]. Moscow, Institut problem riska Publ., OOO Informacionno-izdatelskij centr "Bon Anca" Publ., 2009. 622 p.
12. Vose David. *Risk analysis: A quantitative guide*. John Wiley & Sons, 2008. 729 p.

Received 05.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Літвінова Юлія Сергіївна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6680-662X; e-mail: litjuli56@gmail.com

Сумський Анатолій Олександрович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4278-3317; e-mail: sumskoyanatoliy1996@gmail.com

Литвинова Юлия Сергиевна – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6680-662X; e-mail: litjuli56@gmail.com

Сумской Анатолий Александрович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4278-3317; e-mail: sumskoyanatoliy1996@gmail.com

Litvinova Yuliya Sergievna – Candidate of Engineering Sciences, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technology; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6680-662X; e-mail: litjuli56@gmail.com

Sumskiy Anatolii Oleksandrovich – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4278-3317; e-mail: sumskoyanatoliy1996@gmail.com

UDC 658.511.3 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.11**

D. L. ORLOVSKYI, A. M. KOPP, V. Y. KONDRATIEV

DEVELOPMENT OF A MODEL AND A SOFTWARE SOLUTION TO SUPPORT THE ANALYTICAL DASHBOARDS DESIGN PROBLEM

This research paper considers the problem of dashboard design as part of the Business Process Management lifecycle, where it is become necessary to monitor and control the current state of the organizational business processes. Therefore, designed dashboards should fully correspond to the features of the considered business processes, such as Key Performance Indicators and possible stakeholders, which are considered here as users of the developed Business Intelligence dashboard application. At the same time, according to the state-of-the-art in the field of data visualization, it is required to choose data visualization techniques, which are clear, easy interpretable, space efficient, attractive, and legible. In general, the dashboard design problem requires placing various visualization tools in a relatively small place, such as a screen of a computer, a laptop, a tablet, or even a smart phone, while keeping them accessible and easy to understand. At first, as part of the related work review and analysis, we have considered the core architecture of the dashboards and reporting applications. It is outlined that modern dashboards might use various big data chunks, such as databases of enterprise information systems of different types, spreadsheets data, and even unstructured documents. In order to summarize all the raw data from these data sources, the Data Warehouse should be built and, moreover, it should correspond to the metrics and indicators of business processes that should be demonstrated on a dashboard. We have also considered main principles, common mistakes, and graphs and charts that might be used to design a dashboard for business analytics purposes. Using the existing research in this field, the levels of informativeness were defined for each visualization tool, as well as the best practices of mapping various data types to graphs and charts are outlined. Proposed model of the dashboard design is based on the mathematical optimization. It is used to provide recommendations on which visualization tool should be used to display a certain Key Performance Indicator on a dashboard that corresponds to a certain user role. Development and usage of the software solution that implements the proposed model is outlined, as well as the obtained results of validation of the proposed software solution are shown and discussed.

Keywords: business process management, business intelligence, key performance indicator, business analytics, dashboard, data visualization indicators.

Д. Л. ОРЛОВСЬКИЙ, А. М. КОПП, В. Ю. КОНДРАТЬЄВ

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА ПРОГРАМНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ФОРМУВАННЯ АНАЛІТИЧНИХ ПРИЛАДОВИХ ПАНЕЛЕЙ

У даній роботі розглядається проблема проектування аналітичних приладових панелей як складової частини життєвого циклу управління бізнес-процесами, в рамках якого необхідно виконувати моніторинг та контроль поточного стану організаційних бізнес-процесів. Тому розроблені аналітичні панелі повинні повністю відповідати особливостям розглянутих бізнес-процесів, наприклад, ключових показників ефективності та можливих зацікавлених сторін, які в даній роботі розглядаються в ролі користувачів розробленого застосування інтелектуального аналізу даних, що реалізує необхідні приладові панелі. У той же час, згідно з останніми дослідженнями у галузі візуалізації даних, необхідно вибирати методи візуалізації даних, які є чіткими, легко інтерпретованими, ефективними з точки зору розміщення, привабливими та розбірливими. Загалом проблема проектування приладової панелі вимагає розміщення різних інструментів візуалізації у відносно невеликому місці, наприклад, на екрані комп'ютера, ноутбука, планшета чи навіть смартфона, зберігаючи їх доступними та зрозумілими. Перш за все, в рамках огляду та аналізу існуючих джерел, було розглянуто основну архітектуру аналітичних панелей та застосувань звітування. Зазначається, що сучасні аналітичні панелі можуть використовувати різні великі масиви даних, такі як бази даних корпоративних інформаційних систем різного типу, дані у форматі електронних таблиць і навіть неструктуровані документи. Для узагальнення всіх необроблених даних із цих джерел даних необхідно застосовувати сховища даних, структура яких повинна відповідати метрикам та показникам бізнес-процесів, які необхідно демонструвати на приладовій панелі. Також було розглянуто основні принципи, поширені помилки, графіки та діаграми, які можуть бути використані під час проектування приладової панелі для задач бізнес-аналітики. На основі існуючих досліджень у цій галузі було визначено рівні інформативності для кожного інструменту візуалізації, а також розглянуто найкращі практики відображення різних типів даних за допомогою графіків та діаграм. Запропонована модель побудови приладової панелі базується на задачі математичної оптимізації. Дана модель використовується для надання рекомендацій щодо того, який інструмент візуалізації повинен використовуватися для відображення певного ключового показника ефективності на приладовій панелі, що відповідає певній ролі користувача. Розглянуто інформаційну технологію, що реалізує запропоновану модель, а також отримані результати перевірки працездатності запропонованого програмного рішення та їх обговорення.

Ключові слова: управління бізнес-процесами, інтелектуальний аналіз даних, ключовий показник ефективності, бізнес-аналітика, приладова панель, індикатори візуалізації даних.

Д. Л. ОРЛОВСКИЙ, А. М. КОПП, В. Ю. КОНДРАТЬЕВ

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И ПРОГРАММНОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ПРИБОРНЫХ ПАНЕЛЕЙ

В данной работе рассматривается проблема проектирования аналитических приборных панелей в качестве составной части жизненного цикла управления бизнес-процессами, в рамках которого необходимо выполнять мониторинг и контроль текущего состояния организационных бизнес-процессов. Поэтому разработанные аналитические панели должны полностью соответствовать особенностям рассматриваемых бизнес-процессов, например, ключевых показателей эффективности и возможных заинтересованных сторон, которые в данной работе рассматриваются в качестве пользователей разрабатываемого приложения интеллектуального анализа данных, реализующего необходимые приборные панели. В то же время, согласно последним исследованиям в области визуализации данных, необходимо выбирать методы визуализации данных, которые являются четкими, легко интерпретированными, эффективными с точки зрения размещения, привлекательными и разборчивыми. В общем виде, проблема проектирования приборной панели требует размещения различных инструментов визуализации в относительно небольшом месте, например, на экране компьютера, ноутбука, планшета или даже смартфона, сохраняя их доступными и понятными. Прежде всего, в рамках обзора и анализа существующих источников, была рассмотрена основная архитектура аналитических панелей и приложений отчетности. Отмечается, что современные аналитические панели могут использовать различные крупные массивы данных, такие как базы данных корпоративных информационных систем различного типа, данные в формате электронных таблиц и даже неструктурированные документы. Для обобщения всех необработанных данных из этих источников данных необходимо применять хранилища данных, которые, в частности, должны соответствовать метрикам и показателям бизнес-процессов,

© D. L. Orlovskyi, A. M. Kopp, V. Y. Kondratiev, 2020

которые необходимо демонстрировать на приборной панели. Также были рассмотрены основные принципы, распространенные ошибки, графики и диаграммы, которые могут быть использованы при проектировании приборной панели для задач бизнес-аналитики. На основе существующих исследований в этой области были определены уровни информативности для каждого инструмента визуализации, а также рассмотрены лучшие практики отображения различных типов данных с помощью графиков и диаграмм. Предложенная модель построения приборной панели базируется на задачи математической оптимизации. Данная модель используется для предоставления рекомендаций относительно того, какой инструмент визуализации должен использоваться для отображения определенного ключевого показателя эффективности на приборной панели, соответствующей определенной пользовательской роли. Рассмотрена информационная технология, реализующая предложенную модель, а также полученные результаты проверки работоспособности предложенного программного решения и их обсуждение.

Ключевые слова: управление бизнес-процессами, интеллектуальный анализ данных, ключевой показатель эффективности, бизнес-аналитика, приборная панель, индикаторы визуализации данных.

Introduction. Today Business Process Management (BPM) is considered as the most popular management approach. Its main idea is to consider organizational activity as the set of interrelated business processes. Each business process includes structured set of tasks that take input resources and produces valuable products and/or services for the particular customer [1]. BPM defines so called lifecycle of business processes. It includes stages related to business process identification and discovery (manually or with the help of Process Mining methods and tools [2]), analysis and redesign (continuous improvement methods, such as Plan-Do-Check-Act – PDCA cycle [3]), implementation (e.g., with the help of Business Process Model and Notation – BPMN standard [4], which further is uploaded into a Business Process Management Suite – BPMS in order to provide automated business process execution [5]), monitoring and control (for this purpose such techniques and tools as scorecards with the set of Key Performance Indicators – KPIs are applied [6], as well as Business Intelligence – BI solutions such as Data Warehouses [7] and Analytical Dashboards [8] are used).

This work focuses on methods and tools that are used on the final stage of BPM lifecycle that deals with the monitoring and control. Thus, the research object is a process of the dashboards design for the business process status analysis. The research subject includes a model and a software solution for the dashboard design for the business process status analysis. The goal of this research is to choose data visualization techniques, which are clear, easy interpretable, space efficient, attractive, and legible. However, the dashboard design problem requires placing various visualization tools in a small place, while keeping them accessible and easy to understand [9].

Related work. While the term “dashboard” itself is originated from the automobile dashboard, in the domain of business analysis it describes a type of user interface which provides views of relevant KPIs. Dashboards are displayed on web pages that use linked data warehouses as data sources (fig. 1). Dashboards typically indicate KPIs that require urgent actions at the top of the page [10].

OLAP (Online Analytical Processing) is a computer-based data processing technology, which serves to provide aggregated multidimensional data arrays (cubes) from big data chunks, such as relational databases, documents, flat files, unstructured data sources etc. OLAP cube is the core technology of any OLAP system. It contains numeric data facts called measures that are consolidated by dimensions along which projection operations, such as aggregation or averaging, can be performed in order to enable analysts to answer business questions [11].

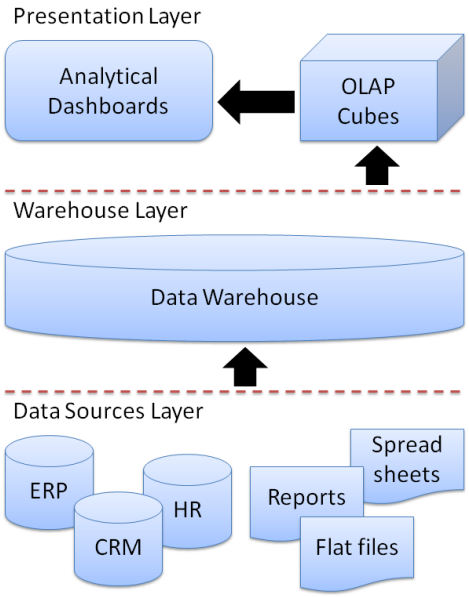


Fig. 1. Simplified view of the dashboards architecture

Whereas considered research domain is not popular enough, the state-of-the-art of the dashboard design was carefully analyzed in paper [12]. Thus, we can focus on three core directions that might help us to solve the considered problem (fig. 2).

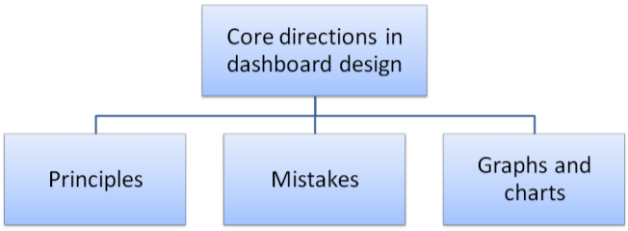


Fig. 2. Core directions in the dashboard design problem

The main principles for the dashboard design include the following [13]:

- Selected chart should fit the best a data type of a certain dataset displayed on a dashboard.
- Selected chart should serve its purpose even if it is resized in order to be place into a small place on a dashboard.

The most common mistakes of the dashboard design are related to the choice of inappropriate data visualization tools such as graphs and charts [13]. As the most suitable visualization tools, bar charts, line charts, pie charts, and gauges are considered [14, 15].

The most informative and popular graphs and charts are the following [15, 16]:

- Bar chart (shown in fig. 3). There are bar charts of different types, such as horizontal, vertical, grouped, and staked bar charts, which might be used to visualize different indicators.



Fig. 3. Horizontal, vertical, grouped, and stacked bar chart examples

- Line chart (shown in fig. 4). These charts might be used to display distributions, trend lines, etc.

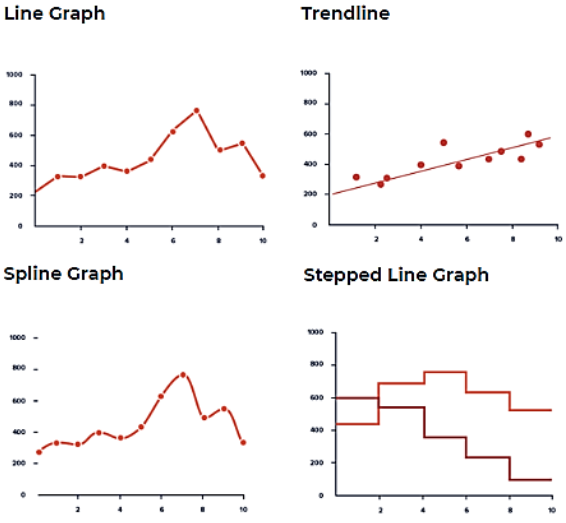


Fig. 4. Line, trend line, spline, and stepped line chart examples

- Bullet graph (shown in fig. 5).



Fig. 5. Bullet graph example

- Scatter chart (shown in fig. 6). As well as other graphs and charts (e.g., line or bar charts), the scatter chart might be used to display three-dimensional (3D) data.

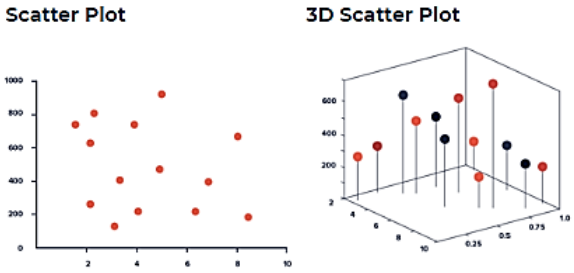


Fig. 6. Scatter and 3D scatter chart examples

- Sparkline (shown in fig. 7). Might be also shown in a form of column charts.

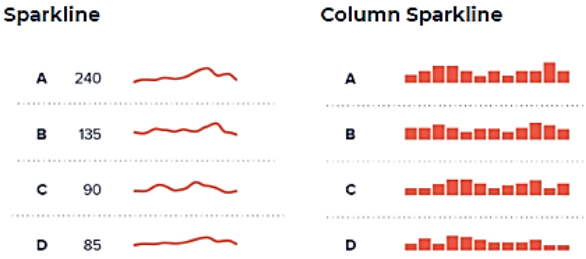


Fig. 7. Sparkline and column sparkline examples

- Gauge (shown in fig. 8). Can be displayed in a form of the angular or a solid chart.

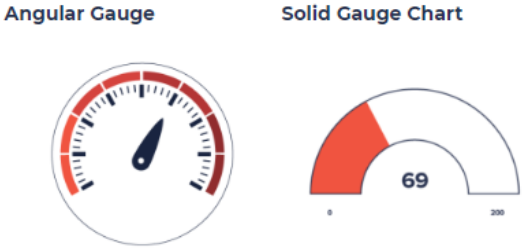


Fig. 8. Angular and solid gauge examples

- Pie chart (shown in fig. 9).



Fig. 9. Pie chart example

Various data visualization graphs and charts ordered by their informativeness are shown in table 1 [15].

Table 1 – Charts ordered by their informativeness

Chart	Estimated informativeness
Bar	53%
Line	46%
Bullet	25%
Scatter	23%
Sparkline	22%
Gauge	12%
Pie	10%

Mapping between data types and graphs and charts is shown in table 2 [15].

Table 2 – Charts ordered by their informativeness

Data type	Charts and graphs
Composition	Bar, Pie
Categories	
Comparison	Line, Scatter
Distribution	
Single value	Number, Sparkline
Difference between an actual and a target value	Bullet, Gauge

Research [17] proposes mathematical models used to define optimal set of charts used to visualize KPIs data on a dashboard. Similar problem is also solved with the help of fuzzy semantic networks [12]. However, the dashboard design mostly depends on users' preferences, which might be quite subjective. It means that various users need to see the same set of KPIs displayed on a dashboard but shown using different charts according to the user's preferences.

Model of the dashboard design. Since each KPI shows a value of the specific data type, we can map KPIs to data types. We can also map data types to possible visualization tools.

These relationships might be formalized using the following matrices:

$$\boldsymbol{A} = \left(a_{ij}\right)_{i=1,j=1}^{n,p}, \boldsymbol{B} = \left(b_{jk}\right)_{j=1,k=1}^{p,q}. \quad (1)$$

Where n is the number of KPIs, p is the number of data types, and q is the number of visualization tools. Both matrices $\boldsymbol{A}$ and $\boldsymbol{B}$ contain only binary values that shows presence or absence of relationship between KPIs and data types (1), as well as between data types and visualization tools respectively:

$$\begin{aligned} a_{ij} &\in \{0,1\}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,p}, \\ b_{jk} &\in \{0,1\}, j = \overline{1,p}, k = \overline{1,q}. \end{aligned} \quad (2)$$

Moreover, each KPI might be assigned to a single data type (2), while the data type might be represented using several visualization tools:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{p} a_{ij} &= 1, i = \overline{1,n}, \\ \sum_{k=1}^{q} b_{jk} &\geq 1, j = \overline{1,p}. \end{aligned} \quad (3)$$

It is required to multiply matrices $\boldsymbol{A}$ and $\boldsymbol{B}$ in order to trace relationships between KPIs and visualization tools that might be used to display values of these KPIs (3):

$$\boldsymbol{C} = \left(c_{ik} = \sum_{l=1}^{p} a_{il} \cdot b_{li} \right)_{i=1,k=1}^{n,q}. \quad (4)$$

Where elements of the matrix C are binary values as well (4), $c_{ik} \in \{0,1\}$, $i = \overline{1,n}$, $k = \overline{1,q}$.

Various users might be interested in analysis of various KPIs according to their roles in business processes and decisions they have to make according to their roles. Therefore, existing mapping of KPIs to visualization tools should be appended with the mapping of user roles in business processes to KPIs.

Therefore matrices $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, and consequently the $\boldsymbol{C}$, should be defined for each t-th user role, $t = \overline{1,s}$:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{A^t} = \left(a_{ij}^t\right)_{i=1,j=1}^{n,p}, \boldsymbol{B^t} = \left(b_{jk}^t\right)_{j=1,k=1}^{p,q}, \\ \boldsymbol{C^t} = \left(c_{ik}^t\right)_{i=1,k=1}^{n,q}. \end{aligned} \quad (5)$$

There are no general recommendations that might be applied to any user with specific preferences (5). Hence, the only possible way to solve this problem is to obtain user's suggestions on KPIs ranks for each user role. The expert judgment procedure will not be considered in this study itself. We only consider that weights of each KPI for each corresponding user role are previously obtained:

$$\boldsymbol{w_t} = \begin{pmatrix} w_{t1} \\ \vdots \\ w_{ti} \\ \vdots \\ w_{tn} \end{pmatrix}, t = \overline{1,s}. \quad (6)$$

Where s is the number of user roles. KPIs weights w_{ti} should be normalized (6), i.e. $w_{ti} \in [0,1]$, $t = \overline{1,s}$, $i = \overline{1,n}$.

Weights of visualization tools λ_k, $k = \overline{1,q}$ might be defined as following (Table 3) by using the normalization of values shown in Table 1.

Table 3 – Weights of graphs and charts

k	Chart	Estimated informativeness	λ_k
1	Bar	53%	1.00
2	Line	46%	0.87
3	Bullet	25%	0.47
4	Scatter	23%	0.43
5	Sparkline	22%	0.42
6	Gauge	12%	0.23
7	Pie	10%	0.19

It is expected that a dashboard might be launched on the devices with various screen resolutions. Thus we have to provide the adaptive dashboard. For this purpose, the screen width should be divided into 12 columns (fig. 10) according to Bootstrap framework [18].

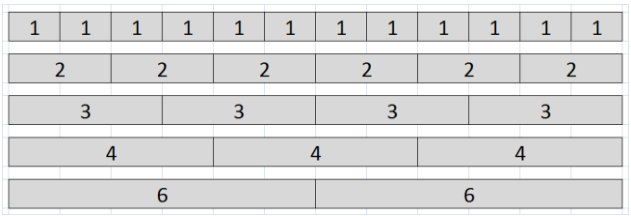


Fig. 10. Screen divided into 12 columns according to Bootstrap

Each visualization tool takes place of a certain width on a dashboard. Thus, it is required to introduce the vector of sizes for each visualization tool l_k, $k = \overline{1,q}$. Moreover, for each t-th user role it is required to define the number of

rows r_t, $t = \overline{1,s}$ in which graphs and charts should be placed. It is well known that human can concentrate only on a limited number of things at once, therefore, the limit number of KPIs required to be placed on a dashboard for the t-th user role $\bar{v}_t \geq 0$, $t = \overline{1,s}$ should be introduced.

The mathematical model of the optimization problem that should be solved to provide recommendations on a dashboard's design is the following:

$$\begin{gathered}\sum_{t=1}^{s}\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{q}(w_{ti}\cdot c_{ik}^{t}\cdot\lambda_k\cdot v_{ik}^{t})\right]\to\max_{\{v_{ik}^{t}\}},\\ \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{q}v_{ik}^{t}\leq\bar{v}_t, t=\overline{1,s},\\ \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{q}v_{ik}^{t}\cdot l_k\leq 12\cdot r_t, t=\overline{1,s},\\ \sum_{k=1}^{q}v_{ik}^{t}\leq 1, i=\overline{1,n}, t=\overline{1,s},\\ v_{ik}^{t}\in\{0,1\}, k=\overline{1,q}, i=\overline{1,n}, t=\overline{1,s}.\end{gathered} \tag{7}$$

Where s is the number or user roles, n is the number of KPIs, q is the number of used visualization tools, w_{ti} describes mapping between t-th user role and i-th KPI, $\{\lambda_k\}$ is the normalized vector of priorities of visualization tools, $\{v_t\}$ is the restrictions vector of the number of KPIs that might be shown on a dashboard, $\{c_{ik}\}$ is the binary matrix that demonstrates possibility of i-th KPI to be displayed using k-th visualization tool, and $\{v_{ik}^{t}\}$ is the result binary matrix, which provides recommendations on which k-th visualization tool should be used to display i-th KPI on a dashboard that corresponds to t-th user role.

There is also situations are possible, where the same user might have multiple roles at the same time, $t^* = \{t^o\}$, $o \in [1,s]$. In this case we need to select such matrix V^* that does not restrict user access to necessary information. Hence the binary matrix that describes indicators and data visualization tools for the user with multiple roles:

$$V^* = \max_{\substack{o\in[1,s]\\ i=\overline{1,n}}}(v_{ik}^{t})\cdot\lambda_k,\ k=\overline{1,q}. \tag{8}$$

Since the optimization variables (8) might take only 0 or 1 values, proposed mathematical model (7) describes the combinatorial optimization problem, which recalls the 0/1 knapsack problem [19] with additional restrictions.

Software solution for the dashboard design. A branch-and-bound method is used for several of NP-hard problems, such as the 0/1 knapsack problem [19]. Therefore, the branch-and-bound method might be used to solve the introduced optimization problem as well.

Developed software uses Google OR-Tools library, which mathematical programming solver class MPSolver implements the branch-and-bound method [20].

Besides the optimization library, the software uses MySQL database management system in order to maintain the database of related data about the user roles, business processes, KPIs, graphs and charts, and the results of the dashboard design. The structure of such database is shown in fig. 11. Spring Boot framework is used to simplify and accelerate development of the Java-based web application, which fronted part is created using Vue.js and Bootstrap frameworks.

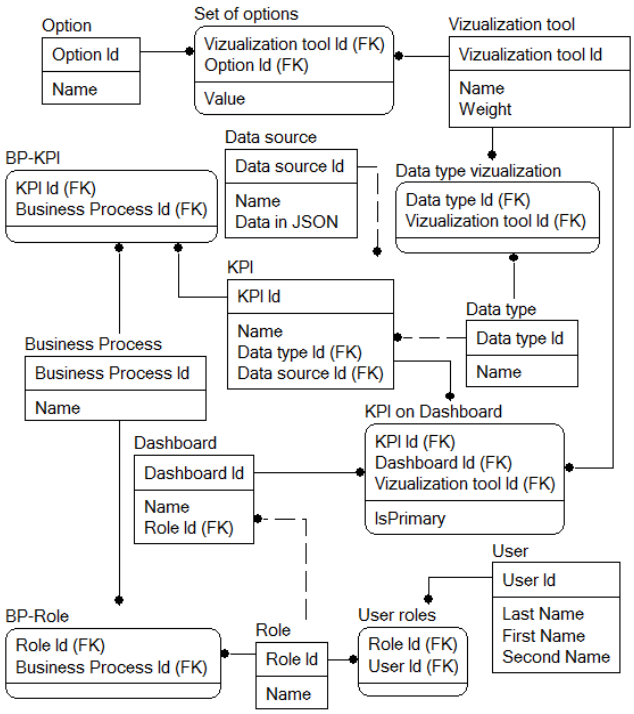


Fig. 11. Database structure

The deployment diagram of the developed software solution is shown below (fig. 12).

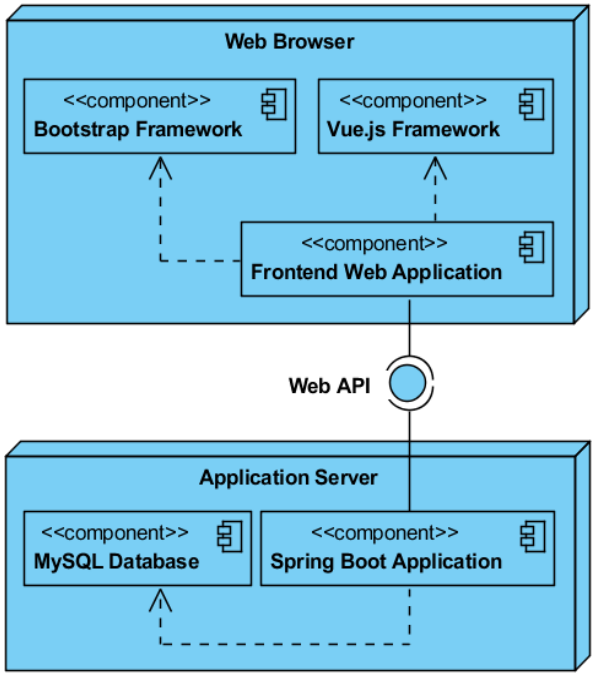


Fig. 12. Deployment diagram of the software solution

Process of the developed software solution usage includes three general activities shown in fig. 18 with the help of the IDEF0 process diagram. The first step includes formulation of the input information for the dashboard design. At first it is required to create a user role (fig. 13).



Fig. 13. Creation of the user role

Then it is necessary to create a business process to which this user role should be assigned (fig. 14).

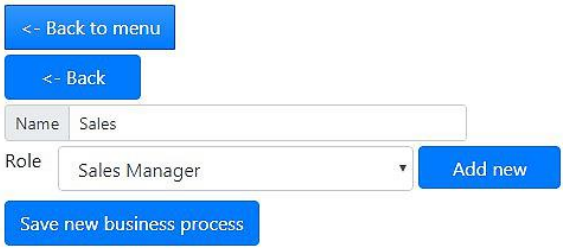


Fig. 14. Creation of the business process

Finally, it is required to create KPIs that are related to the business process (fig. 15):

- KPI "Return on Assets" shows distribution data.
- KPI "Net Income" communicates single value.
- KPI "Operating Expenses" is intended to display difference between actual and target values.

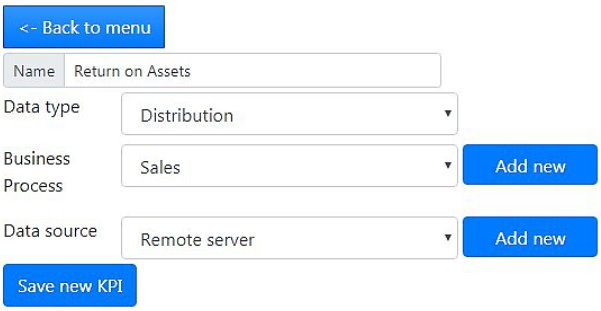


Fig. 15. Creation of the KPI

On the second step all restrictions for the dashboard design should be provided (fig. 16). Weights (6), numbers of rows and KPIs to be placed on the dashboard are set.

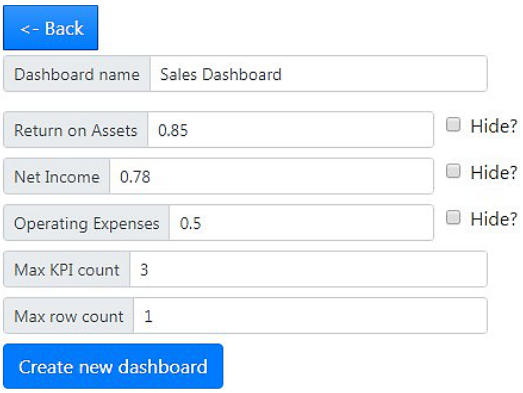


Fig. 16. Configuration of the restrictions

After all the input information and restrictions are specified, it is vital to provide a link to a data source that returns data arrays in a form of JSON documents (Java Script Object Notation) that are easy readable by humans and computers (fig. 17).

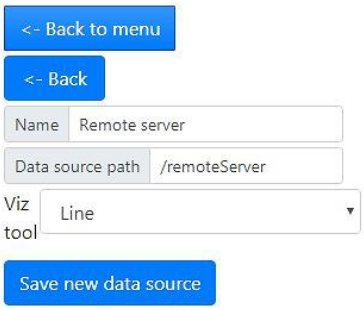


Fig. 17. Configuration of the data source

Suggestions on the dashboard design are obtained in a form of a generated dashboard (fig. 22) that corresponds to the input information (fig. 13–15) and restrictions (fig. 16) with respect to the optimization problem (7).

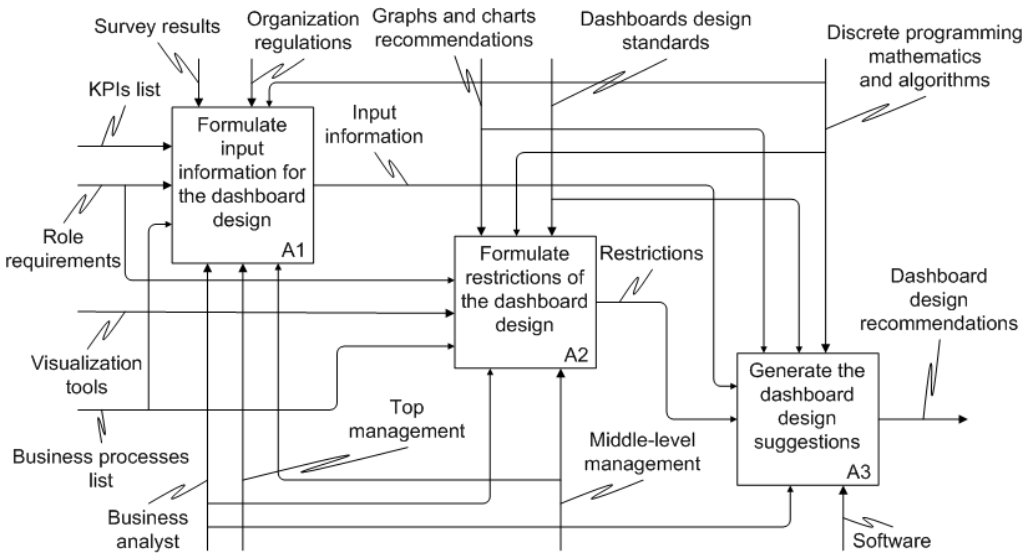


Fig. 18. Process of the developed software solution usage

As it is demonstrated in fig. 22, generated dashboard consists of graphs and charts that best fit to data arrays represented by considered KPIs:

- KPI “Return on Assets” is displayed first by using a line chart.
- KPI “Net Income” is displayed second by using a sparkline indicator.
- KPI “Operating Expenses” is displayed third by using a gauge indicator.

Research results and discussion. Validation of the proposed model and the software solution is performed by emulation of user’s requirements.

The normalized vector of user’s requirements and restrictions on indicators, which should be included in a dashboard, correspond to the values shown in fig. 19. It means that user needs the dashboard that displays a single KPI “Return on Assets”.

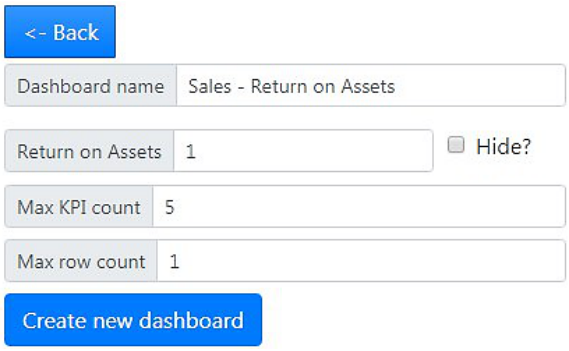


Fig. 19. User’s requirements for a dashboard with one indicator

Obtained dashboard is demonstrated in fig. 20. It is shown that user’s request for the dashboard with a single KPI “Return on Assets” is fulfilled.

It is also possible to replace a visualization tool for the displayed KPI. Thus, the line chart (fig. 20) might be swapped to the scatter chart (fig. 21).

Then let us consider a situation, where user needs to generate the dashboard with all available KPIs (fig. 23). After weights and restrictions are specified, the dashboard design is provided (fig. 25).

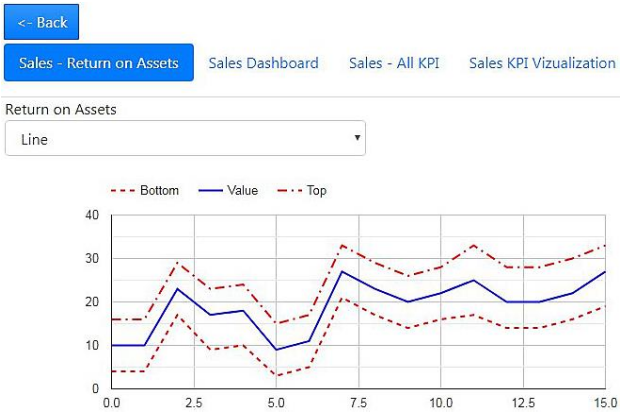


Fig. 20. Generated recommendations for the dashboard design with a single indicator

Modified dashboard is shown below (fig. 21).



Fig. 21. Result of indicator’s replacement

Fig. 25 demonstrates that the software generated the dashboard, which contains 3 of 5 possible KPIs. Such recommendations on the dashboard design were obtained because the restriction for the limit number of rows was not changed. Therefore, the optimal set of indicators was selected according to the model (7).

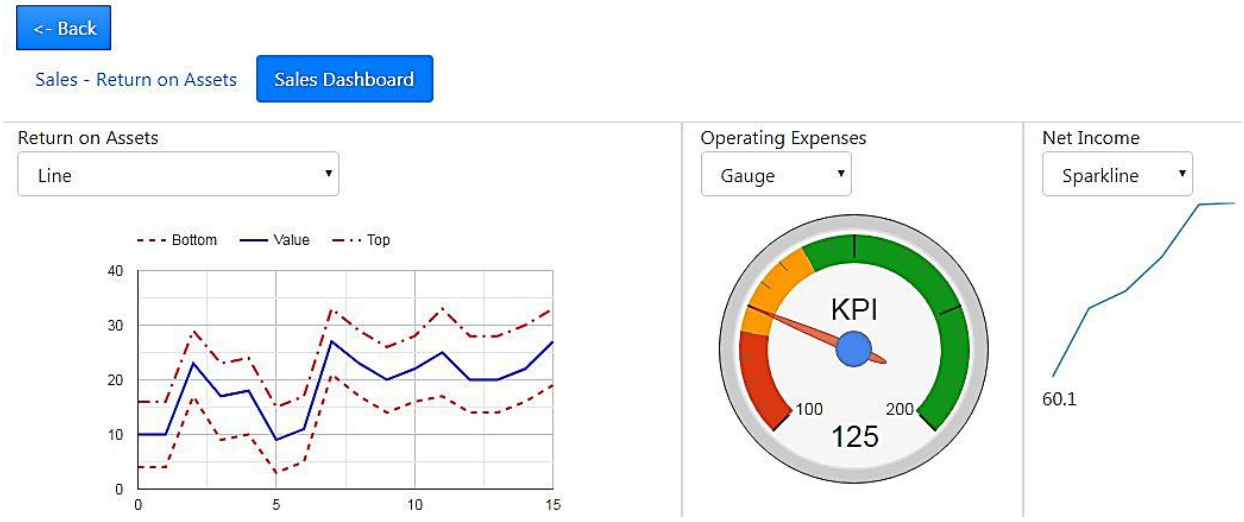


Fig. 22. Generated dashboard based on provided input information and restrictions

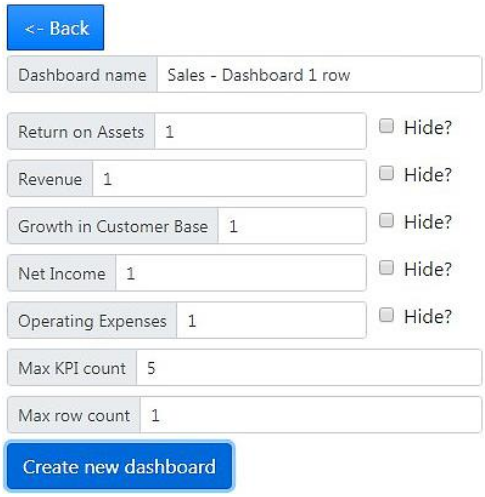


Fig. 23. User's requirements modification

However, it might be necessary to display all KPIs on the same dashboard. For this purpose it is required to update the limit number of rows (fig. 24).

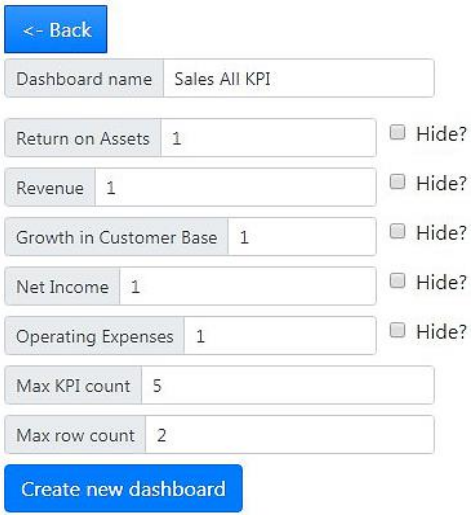


Fig. 24. Increased limit number of records

Extended dashboard is shown in fig. 27. It is shown that generated recommendations (fig. 27) satisfy user's requirements – now the dashboard contains all available KPIs:

- KPI "Revenue".
- KPI "Return on Assets".
- KPI "Operating Expenses".
- KPI "Net Income".
- KPI "Growth in Customer Base".

It is demonstrated (fig. 27), that sequence of KPIs is rearranged in compare to the previously generated result (fig. 25). This is happened because of the different sizes of used graphs and charts that correspond to the Bootstrap layout grid.

Besides recommendations on the dashboard design, developed software demonstrates numerical results of the solution of the optimization problem (7). Such results for the dashboards shown in fig. 25 and 27 are demonstrated below (fig. 26).

1.0 * 0.47 = 0.47	1.0 * 0.47 = 0.47
1.0 * 0.23 = 0.23	1.0 * 0.23 = 0.23
x01 = 0.0	x01 = 1.0
x03 = 0.0	x03 = 0.0
x10 = 1.0	x10 = 1.0
x16 = 0.0	x16 = 0.0
x24 = 1.0	x24 = 1.0
x34 = 0.0	x34 = 1.0
x42 = 1.0	x42 = 1.0
x45 = 0.0	x45 = 0.0
Objective value = 1.89	Objective value = 3.18

Fig. 26. Solutions of the optimization problem (7)

Optimization results (fig. 26) demonstrate how the recommended set of indicators was extended from 3 to 5 KPIs. At the same time, the dashboard's informativeness has been improved from 1.89 to 3.18 (objective value of the optimization problem). However, the number of KPIs displayed on the dashboard has been increased as well,

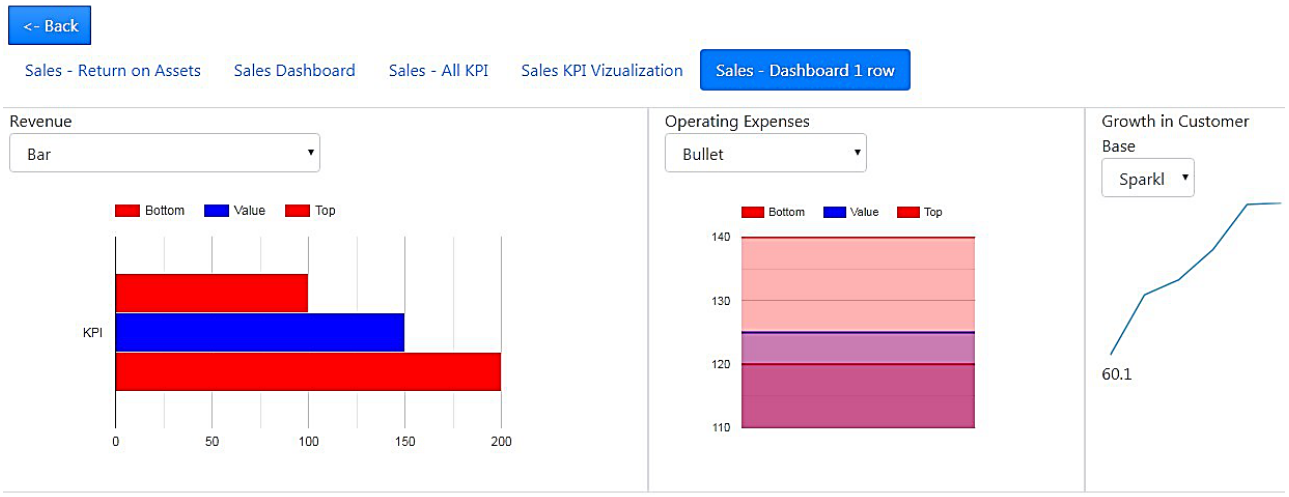


Fig. 25. Generated dashboard with a single row

which means that it is harder to place such dashboard in a small place, e.g. on a smart phone display.

Outlined results (fig. 19–27) show validation of the proposed software solution.

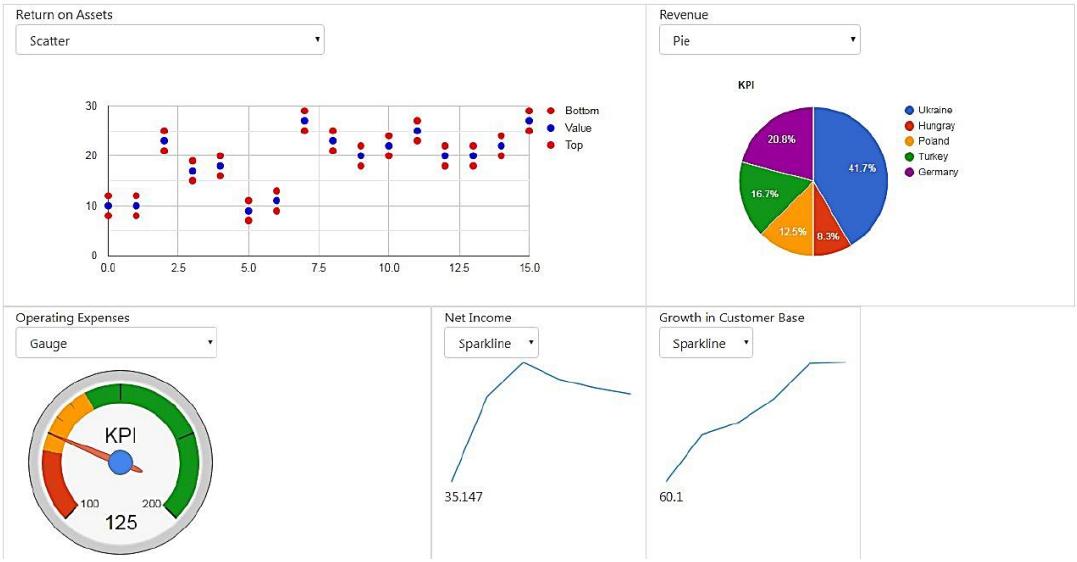


Fig. 27. Generated dashboard with two rows

Conclusion. In this paper we have proposed a model and a software solution for the dashboard design for the business process status analysis. Proposed model is based on the 0/1 knapsack optimization problem but it was extended with some domain-specific restrictions such as number of KPIs to be displayed on a dashboard or a limit of a certain screen on which the dashboard is supposed to be placed. The dashboard design model (7) is used to map KPIs related to a certain business processes, which at the same time belongs to a specific user role, to the various visualization tools, such as graphs and charts, with respect to the introduced restrictions on size and user preference. The software that implements proposed model is created using modern backend and frontend technologies, so it can be easily deployed and maintained. Process of its usage is outlined, its validation is shown, and the obtained results in a form of the generated dashboards are discussed.

Future research in this field includes integration with existing BI software, such as Microsoft Analysis Services and Power BI, Tableau, QlikView or other tools, in order to make the suggested dashboards more independent on used tools, accessible, interoperable, and exchangeable.

References

1. Jeston J. *Business Process Management*. Routledge, 2014. 688 p.
2. Aalst W. *Process Mining: Data Science in Action*. Springer, 2016. 467 p.
3. Rundle R. *Deming Cycle PDCA – Plan Do Check Act Journal in Daily Life Toyota Way*. Independently Published, 2019. 102 p.
4. Allweyer T. *BPMN 2.0: Introduction to the Standard for Business Process Modeling*. BoD – Books on Demand, 2016. 172 p.
5. Seshan P. *Process-Centric Architecture for Enterprise Software Systems*. CRC Press, 2010. 333 p.
6. Raynus J. *Improving Business Process Performance: Gain Agility, Create Value, and Achieve Success*. CRC Press, 2016. 345 p.
7. Jarke M., Lenzerini M., Vassiliou Y., Vassiliadis P. *Fundamentals of Data Warehouses*. Springer Science & Business Media, 2013. 224 p.
8. Liebowitz J. *Business Analytics: An Introduction*. CRC Press, 2013. 288 p.
9. Eckerson W. *Performance Dashboards: Measuring, Monitoring, and Managing Your Business*. John Wiley & Sons, 2010. 336 p.
10. Briggs J. *Management Reports & Dashboard Best Practice*. URL: http://www.gpsustentavel.ufba.br/documentos/dashboard_best_practice_guide.pdf (access date: 10.12.2019).
11. Rocha A. *Marketing and Smart Technologies*. Springer Nature, 2019. 457 p.
12. Kopp A., Orlovskyi D. An Approach to Forming Dashboards for Business Process Indicators Analysis using Fuzzy and Semantic Technologies. *CEUR Workshop Proceedings: PhD Symposium at ICTERI 2018*. 2018. Vol. 2122. P. 1–7.
13. Few S. *Information Dashboard Design: The Effective Visual Communication of Data*. O'Reilly Media, 2006. 211 p.
14. Pappas L., Whitman L. Riding the technology wave: Effective dashboard data visualization. *Human Interface and the Management of Information*. 2011. P. 249–258.
15. Eckerson W., Hammond M. *Visual Reporting and Analysis*. URL: http://cdnlarge.tableausoftware.com/sites/default/files/whitepapers/tdwi_bpreport_q111_vra_tableau.pdf (access date: 10.12.2019).
16. *Data Viz Project – Collection of data visualizations to get inspired and finding the right type*. URL: https://datavizproject.com/ (access date: 10.12.2019).
17. Kopp A. M., Orlovskyi D. L., Kuka D. O. An approach to forming dashboards for business process state analysis. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control, and information technology*. 2017. Vol. 1272, No. 51. P. 44–52.
18. *Bootstrap*. URL: https://getbootstrap.com/ (access date: 10.12.2019).
19. Hurson A. *Advances in Computers*. Academic Press, 2014. 200 p.
20. Neapolitan R. *Foundations of Algorithms*. Jones & Bartlett Publishers, 2015. 664 p.

References (transliterated)

1. Jeston J. *Business Process Management*. Routledge, 2014. 688 p.
2. Aalst W. *Process Mining: Data Science in Action*. Springer, 2016. 467 p.
3. Rundle R. *Deming Cycle PDCA – Plan Do Check Act Journal in Daily Life Toyota Way*. Independently Published, 2019. 102 p.
4. Allweyer T. *BPMN 2.0: Introduction to the Standard for Business Process Modeling*. BoD – Books on Demand, 2016. 172 p.
5. Seshan P. *Process-Centric Architecture for Enterprise Software Systems*. CRC Press, 2013. 333 p.
6. Raynus J. *Improving Business Process Performance: Gain Agility, Create Value, and Achieve Success*. CRC Press, 2016. 345 p.
7. Jarke M., Lenzerini M., Vassiliou Y., Vassiliadis P. *Fundamentals of Data Warehouses*. Springer Science & Business Media, 2013. 224 p.

8. Liebowitz J. *Business Analytics: An Introduction*. CRC Press, 2013. 288 p.
9. Eckerson W. *Performance Dashboards: Measuring, Monitoring, and Managing Your Business*. John Wiley & Sons, 2010. 336 p.
10. Briggs J. *Management Reports & Dashboard Best Practice*. Available at: http://www.gpsustentavel.ufba.br/documentos/dashboard_best_practice_guide.pdf. (accessed 10.12.2019).
11. Rocha A. *Marketing and Smart Technologies*. Springer Nature, 2019. 457 p.
12. Kopp A., Orlovskyi D. An Approach to Forming Dashboards for Business Process Indicators Analysis using Fuzzy and Semantic Technologies. *CEUR Workshop Proceedings: PhD Symposium at ICTERI 2018*. 2018, vol. 2122, pp. 1–7.
13. Few S. *Information Dashboard Design: The Effective Visual Communication of Data*. O'Reilly Media, 2006. 211 p.
14. Pappas L., Whitman L. Riding the technology wave: Effective dashboard data visualization. *Human Interface and the Management of Information.* 2011, pp. 249–258.
15. Eckerson W., Hammond M. *Visual Reporting and Analysis*. Available at: http://cdnlarge.tableausoftware.com/sites/default/files/whitepapers/tdwi_bpreport_q111_vra_tableau.pdf. (accessed 10.12.2019).
16. *Data Viz Project – Collection of data visualizations to get inspired and finding the right type*. Available at: https://datavizproject.com/. (accessed 10.12.2019).
17. Kopp A. M., Orlovskyi D. L., Kuka D. O. An approach to forming dashboards for business process state analysis. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control, and information technology*. 2017, vol. 1272, no. 51, pp. 44–52.
18. *Bootstrap*. Available at: https://getbootstrap.com/. (accessed 10.12.2019).
19. Hurson A. *Advances in Computers*. Academic Press, 2014. 200 p.
20. Neapolitan R. *Foundations of Algorithms*. Jones & Bartlett Publishers, 2015. 664 p.

Received 05.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Орловський Дмитро Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8261-2988; e-mail: ordm@kpi.kharkov.ua

Копп Андрій Михайлович – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри Програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3189-5623; e-mail: kopp93@gmail.com

Кондратьєв Віталій Юрійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри Програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: http://orcid.org/0000-0000-0002-0647-136X; e-mail: vitalij.kondrateev.96@gmail.com

Орловский Дмитрий Леонидович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры Программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8261-2988; e-mail: ordm@kpi.kharkov.ua

Копп Андрей Михайлович – аспирант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры Программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3189-5623; e-mail: kopp93@gmail.com

Кондратьев Виталий Юрьевич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент кафедры Программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0647-136X; e-mail: vitalij.kondrateev.96@gmail.com

Orlovskyi Dmytro Leonidovych – candidate of technical sciences, docent, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technology; Kharkiv, Ukraine; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8261-2988; e-mail: ordm@kpi.kharkov.ua

Kopp Andrii Mykhailovych – postgraduate student, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Assistant of the Department of Software Engineering and Information Technology Management; Kharkiv, Ukraine; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3189-5623; e-mail: kopp93@gmail.com

Kondratiev Vitalii Yuriiovych – National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Student the Department of Software Engineering and Information Technology Management; Kharkiv, Ukraine; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0647-136X; e-mail: vitalij.kondrateev.96@gmail.com

УДК 004.05 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.12**

А. О. ГАПОН, В. М. ФЕДОРЧЕНКО, А. О. ПОЛЯКОВ, В. Ю. ВОЛОВЩИКОВ, В. О. ГУЖВА

АНАЛІЗ МЕТОДОЛОГІЇ DEVSECOPS В ПРОЦЕСАХ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Предметом дослідження в статті є методологія розробки і захисту програмного забезпечення в рамках DevSecOps. Дана методологія змінила підхід до забезпечення безпеки з реактивного на проактивний, а також підкреслює важливість забезпечення безпеки на всіх рівнях організації. DevSecOps означає забезпечення безпеки в розробці додатків від самих ранніх етапів до самого кінця, а також включає в себе автоматизацію деяких шлюзів безпеки, щоб запобігти уповільнення робочого процесу DevOps. Необхідно підтримувати короткі і часто повторювані цикли розробки програмного продукту, а також інтегрувати заходи безпеки. Вибір правильних інструментів для безперервної інтеграції безпеки може допомогти в досягненні цих цілей. Сучасні інструменти автоматизації допомогли організаціям впровадити більш гнучкі методи розробки, а також зіграли свою роль в розробці нових заходів безпеки. Для ефективного захисту DevOps потрібні не тільки нові інструменти, а й зміни в самій організації процесів DevOps, щоб швидше інтегрувати роботу груп фахівців з безпеки з іншими спеціалістами, що призведе до покращення якості продукту. Стаття присвячена детальному аналізу сучасних підходів і методологій систематизації розробки та захисту програмного забезпечення, серед яких SDLC, BSIMM і OpenSAMM. Мета роботи – класифікація підходів до побудови процесів DevSecOps, а також розгляд методологій систематизації існуючих засобів захисту програмного забезпечення, що забезпечують взаємодію команди розробників і фахівців із захисту інформації в рамках одного життєвого циклу розробки. У статті вирішуються наступні завдання: розгляд і аналіз підходів побудови процесів DevSecOps і розгляд методологій систематизації засобів захисту програмного забезпечення. Отримані наступні результати: проаналізовано необхідні складові для побудови DevSecOps процесів. Висновки: проведений аналіз дозволяє класифікувати процес розробки і захисту програмного забезпечення за допомогою методології DevSecOps.

Ключові слова: DevSecOps, Application security, Infrastructure security, SDLC, BSIMM, OpenSAMM.

А. А. ГАПОН, В. М. ФЕДОРЧЕНКО, А. А. ПОЛЯКОВ, В. Ю. ВОЛОВЩИКОВ, В. А. ГУЖВА

АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИИ DEVSECOPS В ПРОЦЕССАХ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Предметом исследования в статье является методология разработки и защиты программного обеспечения в рамках DevSecOps. Данная методология изменила подход к обеспечению безопасности с реактивного на проактивный, а также подчеркивает важность обеспечения безопасности на всех уровнях организации. DevSecOps означает обеспечение безопасности в разработке приложений от самых ранних этапов до самого конца, а также включает в себя автоматизацию некоторых шлюзов безопасности, чтобы предотвратить замедление рабочего процесса DevOps. Необходимо поддерживать короткие и часто повторяемые циклы разработки программного продукта, а также интегрировать меры безопасности. Выбор правильных инструментов для непрерывной интеграции безопасности может помочь в достижении этих целей. Современные инструменты автоматизации помогли организациям внедрить более гибкие методы разработки, а также сыграли свою роль в разработке новых мер безопасности. Для эффективной защиты DevOps требуются не только новые инструменты, но и изменения в самой организации процессов DevOps, чтобы быстрее интегрировать работу групп специалистов по безопасности с другими специалистами, что приведет к улучшению качества продукта. Статья посвящена детальному анализу современных подходов и методологий систематизации разработки и защиты программного обеспечения, среди которых SDLC, BSIMM и OpenSAMM. Цель работы – классификация подходов к построению процессов DevSecOps, а также рассмотрение методологий систематизации существующих средств защиты программного обеспечения, обеспечивающих взаимодействие команды разработчиков и специалистов по защите информации в рамках одного жизненного цикла разработки. В статье решаются следующие задачи: рассмотрение и анализ подходов построения процессов DevSecOps и рассмотрение методологий систематизации средств защиты программного обеспечения. Получены следующие результаты: проанализированы необходимые составляющие для построения DevSecOps процессов. Выводы: проведенный анализ позволяет классифицировать процесс разработки и защиты программного обеспечения с помощью методологии DevSecOps.

Ключевые слова: DevSecOps, Applications ecurity, Infrastructure security, SDLC, BSIMM, OpenSAMM.

A. O. HAPON, V. M. FEDORCHENKO, A. O. POLIAKOV, V. Y. VOLOVSHCHYKOV, V. A. GUZHVA

ANALYSIS OF DEVSECOPS METHODOLOGY IN SOFTWARE DEVELOPMENT PROCESSES

The subject of this research is the software development and protection methodology within DevSecOps. This methodology has changed the approach to ensuring security from reactive to proactive, and also emphasizes the importance of security at all levels of the organization. DevSecOps means providing security in application development from the earliest stages to the very end, and also includes automating some security gateways to prevent DevOps from slowing down the workflow. It is necessary to maintain short and frequently repeated cycles of software product development, as well as integrate security measures. Choosing the right tools for continuous security integration can help achieve these goals. Modern automation tools have helped organizations implement more flexible development methods, and also played a role in the development of new security measures. Effective protection of DevOps requires not only new tools, but also changes in the organization of DevOps processes in order to quickly integrate the work of security teams with other specialists, which will improve the quality of the product. The article is devoted to a detailed analysis of modern approaches and methodologies for systematizing software development and protection, including SDLC, BSIMM and OpenSAMM. The purpose of the work is the classification of approaches to the construction of DevSecOps processes, as well as the consideration of systematization methodologies for existing software protection tools that ensure the interaction of a development team and information protection specialists within one development life cycle. The following tasks are solved in the article: consideration and analysis of DevSecOps process construction approaches and consideration of systematization methodologies for software protection tools. The following results were obtained: the necessary components for the construction of DevSecOps processes are analyzed. Conclusions: the analysis allows us to classify the process of developing and protecting software using the DevSecOps methodology.

Keywords: DevSecOps, Application security, Infrastructure security, SDLC, BSIMM, OpenSAMM.

Вступ. DevOps описує набір практик, які автоматизують процеси між розробниками програмного забезпечення, щоб вони могли швидше і надійніше створювати, тестувати і випускати програмне забезпечення.

© А. О. Гапон, В. М. Федорченко, А.О. Поляков, В.Ю. Воловщиков, В.О. Гужва, 2020

DevSecOps – одна з найважливіших тенденцій DevOps. Це підхід до безпеки операцій, що дозволяє використовувати принципи і кращі практики DevOps для забезпечення кращої, швидкості більш безпечної доставки програмного забезпечення. По суті, це означає, що всі вимоги безпеки з самого початку кодифіковані, а контроль безпеки і розробка здійснюються паралельно, причому безпеку намагаються впровадити в кожну частину процесу agile-розробки. Завдяки цьому DevSecOps може знизити витрати пов'язані з виправленням недоліків безпеки [1].

Цей підхід вигідно відрізняється від моделі того, що було прийнято до DevSecOps, де контроль безпеки був заключним процесом і здійснювався в кінці розробки.

На рис. 1 зображені основні складові DevOps і DevSecOps.

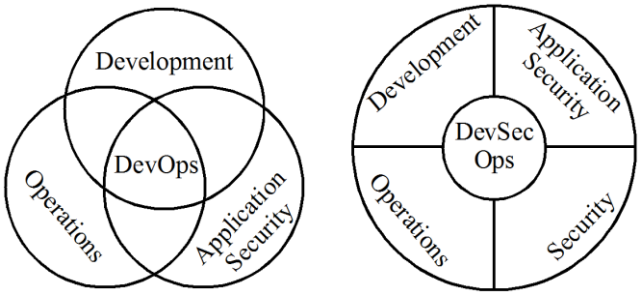


Рис. 1. Порівняння DevOps з DevSecOps

Як і в DevOps, DevSecOps не концентрує налагодження безпеки в одному місці. Весь процес залежить від усіх команд, що беруть участь в розробці. Тобто, робота за двома методологіями ведеться паралельно одними і тими ж учасниками. І тому, цілком можливо, що в найближчому майбутньому їх і зовсім не розділятимуть.

Раннє впровадження гарантування безпеки забезпечує кращу кодову базу і більш високий рівень безпеки. Більш активний підхід до виявлення помилок і дефектів знижує уразливість. Також можна реагувати на інциденти значно швидше, якщо почати розробку свого продукту з урахуванням ризиків.

Рання інтеграція інструментів безпеки в процес розробки програмного забезпечення забезпечує кращий продукт. При запуску автоматичних тестів також виконуються тести безпеки.

Зазвичай, методики для оптимізації процесів розробки програмного забезпечення націлені виключно на підвищення ефективності всередині команди, але в DevSecOps мова йде про застосування автоматизованих інструментів для гарантування комплексного захисту.

Варто зазначити, що кожна з доступних методик стрімко прискорює роботу, жертвуючи при цьому безпекою інфраструктури. Більшість компаній може бути не готова до такого стрибка підвищення вимог якості в даній сфері.

Саме тому, подальший розвиток DevOps порушив питання інформаційної безпеки. Прискорення роботи команд-розробників створило безперервний потік оновлюваних функцій, а також постійний потік даних з боку сервісів, користувачів та інших додатків [2].

Розгортання коду має відбуватися частіше і завершуватися за менший час. Більш короткий час циклу є ознакою оптимізованих процесів, в той час як більш тривалий час може бути ознакою того, що необхідно переглянути свої кращі практики або інструменти кодування.

На рис. 2 зображені етапи циклу розробки DevSecOps.

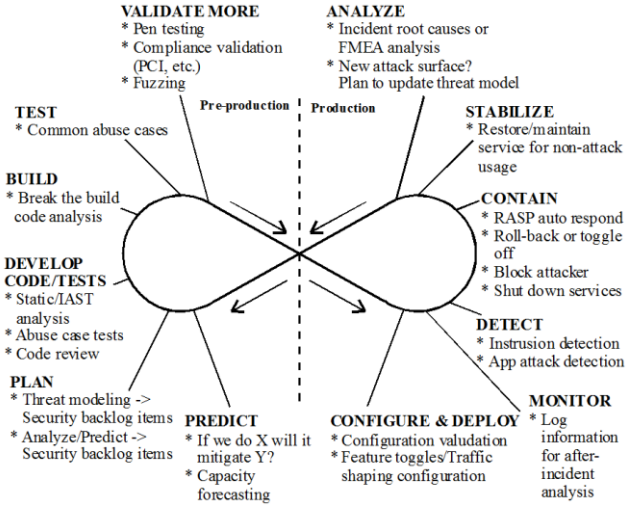


Рис. 2. Цикл розробки DevSecOps

Ризики неякісного коду включають погрози продуктивності і безпеки, які можуть бути дорогими як для компанії, так і для споживача. Код хорошої якості повинен бути послідовним, добре документованим і тестуємим.

DevSecOps може використовуватися, наприклад, при переході на мікросервіси, в процесах Безперервною інтеграції (Continuous Integration, CI) і Безперервного розгортання (Continuous Deployment, CD), або просто для тестування хмарної інфраструктури. Набор конкретних рішень залежить від використовуваного технічного стека і архітектури [3].

Підходи до побудови DevSecOps. Application Security – це розділ безпеки, який відповідає за безпеку додатку. Це не відноситься до інфраструктури або до мережевої безпеки, а саме до того, що пишуть і над чим працюють розробники – це недоліки і уразливості самого додатка [4].

На рис. 3 зображені складові Application Security.

Endpoint Security (безпека кінцевих точок) – відноситься до захисту кінцевих пристроїв кінцевого користувача, таких як настільні комп'ютери, ноутбуки і мобільні пристрої. Кінцеві точки служать точками доступу до корпоративної мережі і створюють точки входу, які можуть бути використані зловмисниками. Endpoint Security захищає ці точки входу від ризикованих дій або зловмисних атак [5].

Content Security Policy (політика захисту контенту, CSP) – це механізм забезпечення безпеки, за допомогою якого можна захищатися від атак з впровадженням контенту, наприклад, міжсайтового скриптинга (XSS, cross site scripting). CSP описує

безпечні джерела завантаження ресурсів, встановлює правила використання вбудованих стилів, скриптів, а також завантаження з ресурсів, що не входять до «білого списку», блокуються [6].

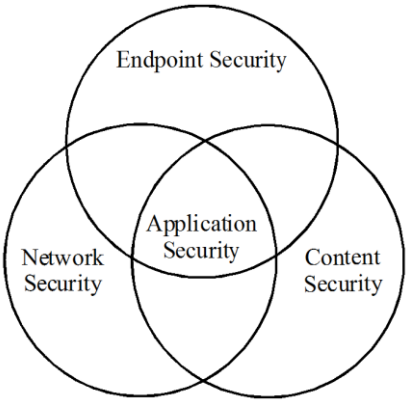


Рис. 3. Складові Application Security

Також важливою складовою DevSecOps є Infrastructure Security. Ключовою сферою знань, яка життєво важлива для будь-якого спеціаліста з безпеки, є чітке розуміння IT-інфраструктури та її взаємозв'язку зі створенням комплексної стратегії безпеки.

Infrastructure Security – це заходи безпеки для захисту інфраструктури, особливо критично важливої інфраструктури, такої як мережеві комунікації, центр зв'язку, серверний центр, центр баз даних і IT-центр. Безпека інфраструктури прагне обмежити вразливість цих структур і систем.

Network Security – положення і політики, прийняті адміністратором мережі для запобігання та моніторингу несанкціонованого доступу, неправильного використання, модифікації або відмови в комп'ютерній мережі. Це передбачає авторизацію доступу до даних в мережі, яка контролюється адміністратором.

Cryptography-Digital Forensics – процес кодування повідомлень або інформації таким чином, що для підслуховуючі або хакери не можуть прочитати і досліджувати цифрові носії криміналістично з метою виявлення, збереження, відновлення, аналізу та подання фактів і думки про інформацію.

Information Security – політика і стратегія захисту інформації від несанкціонованого доступу, використання, розкриття, порушення, модифікації, прочитання, перевірки, записи або знищення. Уряд, військові, корпорації, фінансові установи, лікарні і приватні підприємства накопичують багато конфіденційної інформації про своїх співробітників, клієнтів, продуктах, дослідженнях і фінансовий стан [7].

Команда мережевої безпеки реалізує апаратне і програмне забезпечення, необхідне для захисту архітектури безпеки. При наявності належної мережевої безпеки система може виявляти виникаючі загрози, перш ніж вони проникнуть в мережу і скомпрометують дані. Існує безліч компонентів системи безпеки мережі, які працюють разом, щоб поліпшити стан безпеки [8].

Існує багато кроків, які необхідно вжити, щоб запобігти або хоча б зменшити кількість і серйозність вразливостей в додатках. Звичайно, найкраще виявляти уразливості на ранніх етапах життєвого циклу розробки програмного забезпечення («зсув вліво»), тому що тоді вартість буде меншою. Аналіз і огляд коду грають тут ключову роль. Однак, оскільки не всі проблеми можуть бути виявлені на етапі розробки додатку, зазвичай під час запуску програми через різні шлюзи тестування безпеки додатки перед його випуском і, можливо, обертається і захищається по різному. Після релізу можна додатково захистити додаток, перевіряючи його вхідні дані.

Security development lifecycle. Цикл розробки пропонує шаблон, використування якого полегшує проектування, створення і випуск якісного програмного забезпечення. Це концепція, що визначає процеси і засоби, необхідні для успішного завершення проекту. Метою використання моделі життєвого циклу є створення ефективного, економічно вигідного і якісного програмного продукту.

Security development lifecycle (SDL або SDLC) – концепція розробки, яка полягає у формуванні вимог до додатка, безпечному програмуванні, тестуванні, сертифікації, експлуатації та оновлення. SDL був розроблений компанією Microsoft [9].

На рис. 4 – канонічна модель SDLC, основне завдання якої визначити участь безпеки на кожному етапі розробки, від вимог, до релізу і виходу в експлуатацію.

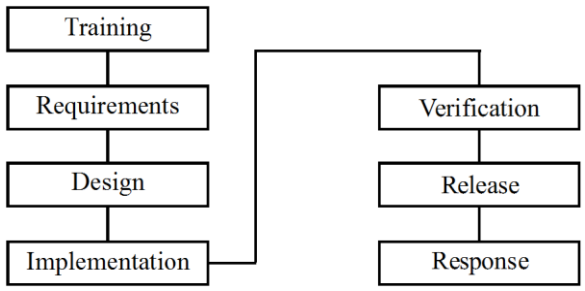


Рис. 4. Security development lifecycle (SDL)

Досвід компанії Microsoft показує, що SDL ефективний у зниженні числа вразливостей безпеки. Первісна реалізація і поступове впровадження елементів складових SDL призвело до значного поліпшення безпеки програмного забезпечення.

Розробка і впровадження життєвого циклу розробки безпеки являє собою серйозну інвестицію для Microsoft і серйозне змінення в тому, як програмне забезпечення проектується, розробляється і тестується [10].

Application Security і SDLC спрямовані не на виявлення вразливостей, а на запобігання їх появи. Згодом канонічний SDLC від Microsoft був сильно деталізований в різних методологіях – OpenSAMM, BSIMM.

Building Security In Maturity Model. BSIMM описує методологію систематизації існуючих заходів забезпечення безпеки в галузі програмного забезпечення. Кількісно оцінюючи практику багатьох різних

організацій, за допомогою BSIMM можна описати підходи що поділяються багатьма, а також відмінності, які роблять кожен з них унікальним.

BSIMM дозволяє побудувати довгостроковий план по гарантуванню безпеки програмного забезпечення і відстеження просування відповідно до цього плану.

Основа методології – поділ процесу Application Security на 4 домена: Governance, Intelligence, SSDL Touchpoints і Deployment. У кожному домені 12 практик, які представлені у вигляді 119 активностей.

На рис. 5 зображені складові методології систематизації підходів гарантування безпеки програмного забезпечення BSIMM.

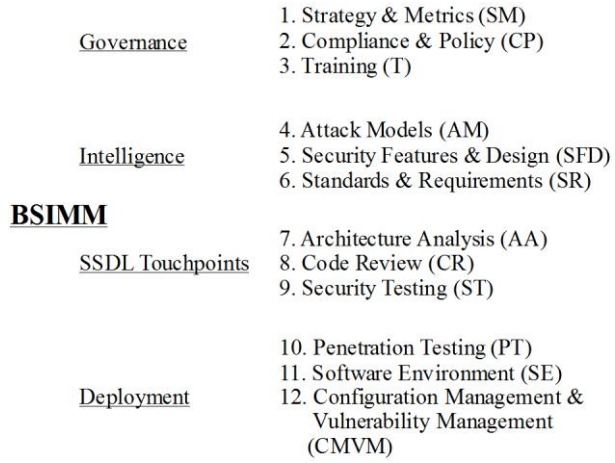


Рис. 5. Building security in maturity model (BSIMM)

Governance – це практики, які допомагають організовувати, управляти і вимірювати ініціативу щодо забезпечення безпеки програмного забезпечення.

Intelligence – це практики, які призводять до накопичення корпоративних знань, використовуваних при проведенні заходів щодо забезпечення безпеки програмного забезпечення в усій організації.

SSDL Touchpoint – це практики, пов'язані з аналізом і перевіркою конкретних артефактів і процесів розробки програмного забезпечення.

Deployment – це практики, які взаємодіють з традиційною мережевою безпекою та підтримки програмного забезпечення [11].

У кожної з 119 активностей є 3 рівня зрілості: початковий, середній і просунутий. Усі 12 практик можна вивчати по розділах, відбирати важливі елементи, розбиратися, як їх впроваджувати і поступово додавати елементи, наприклад, статичний і динамічний аналіз коду або огляд коду [12].

OpenSAMM. Модель зрілості Software Assurance (SAMM) описує методологію систематизації, котра допомагає організаціям формулювати і реалізовувати стратегію забезпечення безпеки програмного забезпечення, адаптовану до конкретних ризиків, з якими стикається організація [13].

В основі моделі лежать основні бізнес-функції розробки програмного забезпечення, до яких прив'язані методи забезпечення безпеки

Будівельні блоки моделі – це три рівня зрілості, певні для кожної з дванадцяти практик забезпечення безпеки. Вони визначають широкий спектр можливостей, який організація може задіяти, щоб знизити ризики безпеки і підвищити надійність програмного забезпечення.

На рис. 6 зображені складові методології систематизації підходів гарантування безпеки програмного забезпечення SAMM.

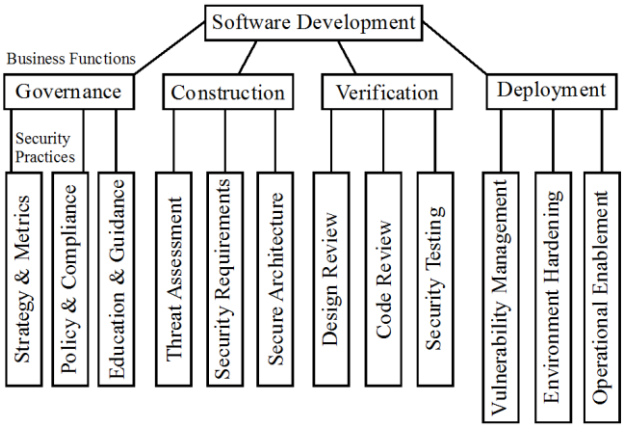


Рис. 6. Software Assurance Maturity Model (SAMM)

На найвищому рівні SAMM визначає чотири критичних бізнес-функції. Кожна бізнес-функція являє собою категорію дій, пов'язаних з основними моментами розробки програмного забезпечення [14].

Для кожної бізнес-функції SAMM визначає три практики безпеки. Кожна практика безпеки є областю діяльності, що пов'язана з безпекою, яка створює гарантії для відповідної бізнес-функції.

Таким чином, в цілому існує дванадцять практик безпеки, які є незалежними сховищами для поліпшень, які відображаються в бізнес-функції розробки програмного забезпечення.

Governance – це те, як організація управляє діяльністю з розробки програмного забезпечення. Він забезпечує відносини між ефективними бізнес-процесами і групами розробників, забезпечуючи ефективний вимірний процес і правила взаємодії.

Construction – це те, що стосується процесів і діяльності, пов'язаних з бізнес-цілями і проектами розвитку. В цілому, він визначає процес створення програми, який включає дії, пов'язані з управлінням продуктом, збором вимог, специфікацією архітектури високого рівня, детальним проектуванням і аналізом реалізації.

Verification – це перевірка і тестування програмного забезпечення. Основна увага приділяється процесам і діям, пов'язаним з тим, як організація аналізує і тестує створені об'єкти в ході розробки програмного забезпечення.

Deployment – це бізнес-вимоги до розгортання, що описують процеси і дії, пов'язані з процедурами випуску програмного забезпечення. Сюди також входить спосіб доставки продуктів кінцевим користувачам, розгортання таких саме і очікуваних операцій в середовищі виконання.

Для кожної практики безпеки SAMM визначає три рівні зрілості як цілі. Кожен рівень в практиці безпеки характеризує послідовно більш складні цілі, що визначають конкретні дії і більш суворі метрики, ніж на попередньому рівні. Крім того, кожна практика безпеки може бути поліпшена незалежно, хоча пов'язані дії можуть привести до оптимізації.

Висновки. DevSecOps дозволяє організації застосовувати попереджуючий підхід до безпеки. Це спонукає розробників програмного забезпечення інтегрувати безпеку в свої повсякденні зусилля. У той же час групи безпеки можуть працювати з розробниками програмного забезпечення, щоб допомогти організації виявити і усунути вразливості безпеки, перш ніж вони вийдуть з-під контролю.

DevSecOps змінює безпеку з реактивної на проактивну, а також підкреслює важливість безпеки на всіх рівнях організації, і уповноважує співробітників служби безпеки приймати рішення, які мають позитивний вплив на їхній бізнес. Таким чином, DevSecOps, як концепція і практика, весь час розвивається, зі збільшенням кількості організацій, які впроваджують DevSecOps як рішення для їх проблеми безпеки [15].

Попит на DevSecOps збільшиться в організаціях всіх розмірів і у всіх галузях. У міру того, як все більше організацій шукають способи виявлення та виправлення проблем безпеки на ранніх етапах процесу розробки програмного забезпечення, попит на інструменти для підтримки DevSecOps відповідно збільшуватиметься.

Організація, яка впроваджує інструменти DevSecOps сьогодні, може пожинати плоди цих інвестицій на роки вперед. Надаючи розробникам програмного забезпечення і командам безпеки зручні та ефективні інструменти DevSecOps, організація розвиває культуру співпраці, спілкування, прозорості та відкритості. В результаті ця організація створює середовище, в якій розробники та групи безпеки постійно удосконалюються.

Переваги, які DevSecOps приносить компаніям це – зниження витрат, збільшення швидкості доставки, швидкості відновлення, відповідність в масштабі і пошуку загроз. Сукупний ефект цих переваг – це підвищення ділової репутації та більш плавна бізнес-модель. DevSecOps успішно видалить бар'єри між DevOps і Security, яка заважають їм працювати як єдине ціле.

DevSecOps матиме можливість знаходити і виправляти проблеми безпеки на початку процесу розробки, тим самим значно скорочуючи витрати, пов'язані з їх виявленням і виправленням.

Дуже важливо включити гарантування безпеки в життєвий цикл розробки Agile. Завдяки DevSecOps розробники можуть краще зрозуміти критичність уразливостей, які існують у їхньому коді, і виправити ці вразливості, надаючи швидкі, але більш безпечні продукти або рішення. Оскільки підхід DevSecOps автоматизований, тому команді розробників більше не потрібно записувати правила безпеки у свій код. DevSecOps знижує ризик перенапруження даних, оптимально застосовуючи ресурси.

Список літератури

1. *ITFB*. URL: https://itfb.com.ua/chto-takoe-devsecops (дата звернення: 2.11.2019).
2. *System-Admins*. URL: https://system-admins.ru/razrabotka-zashhishhennyx-prilozhenij-s-pomoshhyu-devsecops (дата звернення: 4.11.2019).
3. *Antimalware*. URL: https://www.anti-malware.ru/analytics/ Technology_Analysis/what-is-devsecops-developing-more-secure-applications#part5 (дата звернення: 2.11.2019).
4. *Newcontext*. URL: https://www.newcontext.com/what-is-devsecops (дата звернення: 2.11.2019).
5. *Forcepoint*. URL: https://www.forcepoint.com/cyber-edu/endpoint-security (дата звернення: 10.11.2019).
6. *Habr*. URL: https://habr.com/ru/company/nix/blog/271575 (дата звернення: 12.11.2019).
7. *IGI-Global*. URL: https://www.igi-global.com/chapter/managing-compliance-with-an-information-security-management-standard/112547 (дата звернення: 15.11.2019).
8. *Secureworks*. URL: https://www.secureworks.com/blog/cybersecurity-vs-network-security-vs-information-security (дата звернення: 4.11.2019).
9. *Microsoft*. URL: https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/ms995349(v=msdn.10)?redirectedfrom=MSDN (дата звернення: 20.11.2019).
10. *BSIMM*. URL: https://www.bsimm.com/about.html (дата звернення: 23.11.2019).
11. *Synopsys*. URL: https://www.synopsys.com/software-integrity/resources/knowledge-database/what-is-bsimm.html (дата звернення: (20.11.2019).
12. *Habr*. URL: https://habr.com/ru/company/oleg-bunin/blog/448488 (дата звернення: 20.11.2019).
13. *OpenSAMM*. URL: https://opensamm.org/downloads/SAMM-1.0-en_US.pdf (дата звернення: 20.11.2019).
14. *Hack2Secure*. URL: https://www.hack2secure.com/blogs/summarizing-open-software-assurance-maturity-model-opensamm-requirements (дата звернення: 21.11.2019).
15. *DevSecOps Whitepaper*. URL: https://www.devseccon.com/wp-content/uploads/2017/07/DevSecOps-whitepaper.pdf (дата звернення: 23.11.2019).

References (transliterated)

1. *ITFB*. URL: https://itfb.com.ua/chto-takoe-devsecops (access date: 2.11.2019).
2. *System-Admins*. URL: https://system-admins.ru/razrabotka-zashhishhennyx-prilozhenij-s-pomoshhyu-devsecops (access date: 4.11.2019).
3. *Antimalware*. URL: https://www.anti-malware.ru/analytics/Technology_Analysis/what-is-devsecops-developing-more-secure-applications#part5 (access date: 2.11.2019).
4. *Newcontext*. URL: https://www.newcontext.com/what-is-devsecops (access date: 2.11.2019).
5. *Forcepoint*. URL: https://www.forcepoint.com/cyber-edu/endpoint-security (access date: 10.11.2019).
6. *Habr*. URL: https://habr.com/ru/company/nix/blog/271575 (access date: 12.11.2019).
7. *IGI-Global*. URL: https://www.igi-global.com/chapter/managing-compliance-with-an-information-security-management-standard/112547 (access date: 15.11.2019).
8. *Secureworks*. URL: https://www.secureworks.com/blog/cybersecurity-vs-network-security-vs-information-security (access date: 4.11.2019).
9. *Microsoft*. URL: https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/ms995349(v=msdn.10)?redirectedfrom=MSDN (access date: 20.11.2019).
10. *BSIMM*. URL: https://www.bsimm.com/about.html (access date: 23.11.2019).
11. *Synopsys*. URL: https://www.synopsys.com/software-integrity/resources/knowledge-database/what-is-bsimm.html (access date: (20.11.2019).
12. *Habr*. URL: https://habr.com/ru/company/oleg-bunin/blog/448488 (access date: 20.11.2019).

13. *OpenSAMM*. URL: https://opensamm.org/downloads/SAMM-1.0-en_US.pdf (access date: 20.11.2019).
14. *Hack2Secure*. URL: https://www.hack2secure.com/blogs/summarizing-open-software-assurance-maturity-model-opensamm-requirements (access date: 21.11.2019).
15. *DevSecOps Whitepaper*. URL: https://www.devseccon.com/wp-content/uploads/2017/07/DevSecOps-whitepaper.pdf (access date: 23.11.2019).

Надійшла (received) 02.04.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гапон Андрій Олександрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри безпеки інформаційних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2560-7426; e-mail: gapon.andrei@gmail.com

Федорченко Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри безпеки інформаційних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7359-1460; e-mail: fedorchenko.fedor@gmail.com

Поляков Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, доцент кафедри інформаційних систем; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1805-9011; e-mail: polyakov.andrey@gmail.com

Воловщиков Валерій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4454-2314; e-mail: valera@kpi.kharkov.ua

Гужва Віктор Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6832-4480; e-mail: guzhva.v.a@gmail.com

Гапон Андрей Александрович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры безопасности информационных технологий; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2560-7426; e-mail: gapon.andrei@gmail.com

Федорченко Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры безопасности информационных технологий; г. Харьков, Украина; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7359-1460; e-mail: fedorchenko.fedor@gmail.com

Поляков Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный экономический університет, доцент кафедры информационных систем; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1805-9011; e-mail: polyakov.andrey@gmail.com

Воловщиков Валерий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4454-2314; e-mail: valera@kpi.kharkov.ua

Гужва Виктор Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6832-4480; e-mail: guzhva.v.a@gmail.com

Hapon Andrii Oleksandrovich – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate of Department of Information Technology Security; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2560-7426; e-mail: gapon.andrei@gmail.com

Fedorchenko Volodymyr Mykolayovych – Candidate of Engineering Sciences, Docent, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Information Technology Security; Kharkiv, Ukraine; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7359-1460; e-mail: fedorchenko.fedor@gmail.com

Polyakov Andrii Oleksandrovich – Candidate of Engineering Sciences, Docent, Semen Kuznets Kharkiv National Economic University, Associate Professor of the Department of Information Systems; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1805-9011; e-mail: polyakov.andrey@gmail.com

Volovshchykov Valeriy Yuriyovich – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4454-2314; e-mail: valera@kpi.kharkov.ua

Guzhva Viktor Alexeevich – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6832-4480; e-mail: guzhva.v.a@gmail.com

УДК 004.9 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.13**

S. V. OREKHOV, H. V. MALYHON

VIRTUAL PROMOTION KNOWLEDGE MANAGEMENT TECHNOLOGY

The article presents a new concept of "Management of knowledge about virtual promotion" on the Internet. Usually a real product or service is being divided into four components (product, price, promotion and place) in accordance with the theory of marketing. One of the components is a product promotion. But now this element is becoming a fully virtual tool. It is necessary to consider product promotion as an image or a copy of a real product in a virtual space that lives in parallel on the network. Therefore, the objective of the paper is the presentation of a new object of research based on the experience of more than thirty real projects performed in Ukraine, USA, Europe and Canada. We regard the promotion as a software product, which works according to principles of knowledge management and machine learning. It is proposed that virtual promotion is characterized by four views: customer or user, data, technology and marketing. Thus, the structure of virtual promotion business process was presented. It includes four steps: selection of hypertext sources, knowledge representation and extraction, semantic kernel building and quality criterion evaluation to stop the process. Based on the process structure the research tasks were identified. The central task is semantic kernel forming. Then the software architecture was developed. IT solution contains CRM system as accounting tool and Web site as an image of virtual promotion. CRM plays main role as a commander center. Here we form semantic kernel and then send it via marketing channels such as Web site, telegram or viber accounts. Another part of IT solution is Web service such as Bing API or Google API. They help us to build the kernel. Also the paper demonstrates the list of future tasks that should be solved and the example of real project of proposed approach.

Keywords: Product promotion, CRM, SEO, knowledge management.

С. В. ОРЄХОВ, Г. В. МАЛИГОН

ТЕХНОЛОГІЯ УПРАВЛІННЯ ЗНАННЯМИ ПРО ВІРТУАЛЬНЕ ПРОСУВАННЯ

У статті представлена нова технологія «управління знаннями про віртуальне просування» в мережі Інтернет. Звичайно реальний продукт або послуга характеризуються наступними компонентами: продукт, ціна, просування і місце, згідно з теорією маркетингу. Одним з компонентів є просування товару. Однак зараз цей елемент стає повністю віртуальним інструментом. Необхідно розглядати просування продукту як відображення або копію реального продукту у віртуальному просторі. Це відображення існує паралельно у мережі та безпосередньо впливає на реальний продукт чи послугу. Тому ціллю статті є презентація нового об'єкта дослідження, поява якого основана на досвіді виконання більш ніж тридцяти реальних проектів в Україні, США, Європі та Канаді. Ми працюємо відповідно до принципів управління знаннями і машинного навчання. Передбачається, що віртуальне просування характеризується чотирма репрезентаціями: клієнт або користувач, дані, технологія та маркетинг. Далі була представлена структура бізнес–процесу віртуального просування. Він включає чотири етапи: вибір джерел гіпертексту, подання та витяг знань, побудова семантичного ядра і оцінка критерію якості для зупинки процесу. На основі структури процесу були визначені задачі дослідження. Центральна задача – формування семантичного ядра. Потім була розроблена архітектура програмного забезпечення. ІТ рішення містить CRM систему в якості інструменту обліку та Веб сайт як образ віртуального просування. CRM грає роль командного центру. Тут формується семантичне ядро і потім відправляється через маркетингові канали, такі як Веб сайт, Телеграм канали або профілі в Вайбері. Інша частина ІТ рішення – це Веб сервіс, такий як Bing API або Google API. Вони допомагають нам побудувати ядро. Також в статті наведено список майбутніх завдань, які необхідно вирішити, і приклад реальних проектів в рамках запропонованого підходу.

Ключові слова: Просування продукту, CRM, SEO, управління знаннями.

С. В. ОРЕХОВ, Г. В. МАЛИГОН

ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ О ВИРТУАЛЬНОМ ПРОДВИЖЕНИИ

В статье представлена новая технология «управление знаниями о виртуальном продвижении» в среде Интернет. Обычно реальный продукт или услуга характеризуются четырьмя компонентами (продукт, цена, продвижение и место) в соответствии с теорией маркетинга. Одним из компонентов является продвижение товара. Однако сейчас этот элемент становится полностью виртуальным инструментом. Необходимо рассматривать продвижение продукта как отображение или копию реального продукта в виртуальном пространстве. Это отражение существует параллельно в сети и непосредственно влияет на реальный продукт или услугу. Поэтому целью статьи является презентация нового объекта исследования, основанного на опыте более тридцати реальных проектов, выполненных в Украине, США, Европе и Канаде. Мы рассматриваем продвижение как программный продукт, который работает в соответствии с принципами управления знаниями и машинного обучения. Предполагается, что виртуальное продвижение характеризуется четырьмя репрезентациями: клиент или пользователь, данные, технологии и маркетинг. Далее была представлена структура бизнес–процесса виртуального продвижения. Он включает четыре этапа: выбор источников гипертекста, представление и извлечение знаний, построение семантического ядра и оценка критерия качества для остановки процесса. На основе структуры процесса были определены задачи исследования. Центральная задача – формирование семантического ядра. Затем была разработана архитектура программного обеспечения. ИТ решение содержит CRM систему в качестве инструмента учета и Веб сайт как образ виртуального продвижения. CRM играет главную роль командного центра. Здесь мы формируем семантическое ядро и затем отправляем его через маркетинговые каналы, такие как Веб сайт, Телеграмм каналы или профили в Вайбере. Другая часть ИТ решения – это Веб сервис, такой как Bing API или Google API. Они помогают нам построить ядро. Также в статье приведен список будущих задач, которые необходимо решить, и пример реальных проектов в рамках предложенного подхода.

Ключевые слова: Продвижение продукта, CRM, SEO, управление знаниями.

Introduction: Problem and Research Goals. During last ten years more than thirty different projects in the fields of CRM, SEO [1–2], software engineering, start-up building were performed. The application areas were pharmaceutical marketing process, wood selling, drug production and selling, jewelry production and selling, market research business, online e-commerce, auto–parts selling etc. All projects have the same element – online selling process. The main distinguishing features of this process are that it runs on the Internet and, as a rule, in automatic mode. That is, it is autonomous and as integrated as possible with other processes such as finance (contracts

© S. V. Orekhov, H. V. Malyhon, 2020

and payments) and delivery (accounting and warehousing of goods). In other words, we are moving to the level of interaction between business units, which are represented by various autonomous software systems. These software systems can work both on a single platform and outside it. Only formats and data transmission channels are consistent (data integration). Further development of this situation leads to the emergence of separate software modules – intelligent agents. Each agent performs a specific list of tasks (not just functions). That is, it incorporates a set of algorithms (knowledge), which potentially can be changed, improved. These changes are made by the developer on the instructions of the customer.

The results obtained were not something new, because a study of IT development trends over the past thirty years clearly indicates the following features. First, as was shown by the results of the CRM project from IBM, the reason of the interaction between the client and the supplier of the product or service has been changed. The main goal of this interaction is to transfer unique knowledge from the supplier to the client, which he can use to meet his needs, fig. 1, *a*.

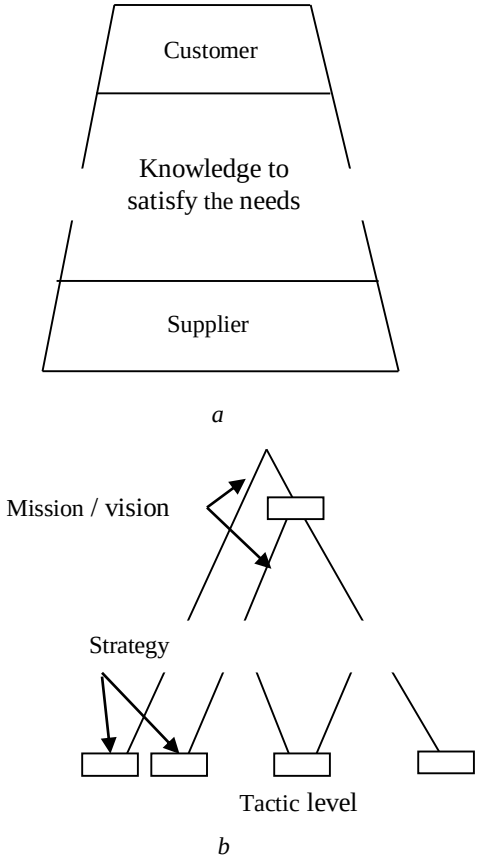


Fig. 1. CRM project conclusions

As a result, a new vision is formed: the pyramid of needs is replaced by a pyramid of knowledge (fig. 1, *b*). It includes three levels: vision or mission, strategy (algorithms) and tactics (technologies). To control such a pyramid, it is necessary to use modern software.

The supplier forms a pyramid of knowledge that must be managed. In addition, part of this knowledge is transferred to the client along with the real product. Thus, part of the supplier's knowledge is separated from the business system and placed on the Internet. We will call this part of knowledge "virtual promotion" (VP). In the literature this effect was registered at first as paradigm of WEB 1.0 – 2.0, when a business develops WEB site to promote its product or service [3–4].

Virtual promotion (VP) characterizes by four views: user, data, technology and marketing (fig. 2). The end user, in order to gain knowledge hidden in virtual promotion, is faced with one of four virtual views: a web page, a profile on a social media, a video clip or a telegram channels. These tools operate on data in three main formats. These formats contain links and keywords to put everything together.

Next view is involved in four core technologies. Marketing representation only captures the final desires of the client and supplier. Be the first in search of a server, so in the mind of client. This primary condition is reinforced by quality factors for SWEBOK model [5]. This is not predetermined. The client expects and seeks knowledge. Therefore, they must be managed.

Let us formulate the definition of a new research object "virtual promotion" and its characteristics. Firstly, the purpose of the functioning of this object is to ensure the quick and effective appearance of information about the product or service in the minds of potential customers. Such an appearance will be effective if, in response to a query from a search server or search engine on a social network, product information was in first place (first page in a response to a search query).

Secondly, the structure of virtual promotion is a combination of knowledge in the field of marketing and software engineering. Such a body of knowledge is capable of accumulating, storing and transmitting only information technology. Consequently, virtual promotion is a technology based on software or artifacts that describe the software development process. Thus, it is possible to apply software engineering and its methods to virtual promotion.

Then, thirdly, the parameters of virtual promotion become factors, criteria and metrics of software quality (SWEBOK), as well as metrics of marketing activities [6].

Fourth, the synergistic effect of the new technology is based on the application of knowledge management methods and Internet technologies [7].

Fifth, VP exists in parallel mode with the real product or service. Thus, we develop it as we do it with software, for example.

Problem statement. The main problems of virtual promotion functionality are:

Incomplete information. VP is based on the idea that the information about a product should be on the first position. But what kind of data we have as input and output.

At the moment, we regard as output the list of links generated by search engine and believe that would be enough to reach our preliminary goal in term of marketing. As input we consider the combination of hypertext, videos and images stored in Internet. In general, this hypertext describes the knowledge how a user satisfies some need using a product or service. Also user is interested in the quality of product or service if he (she) buys it. It is

necessary to know the price of possession of a product. And so on. On the other hand, the volume of hypertext is restricted by communication channel. The channel is being built between a user and VP via search engine. Usually user is not ready to read all texts fully.

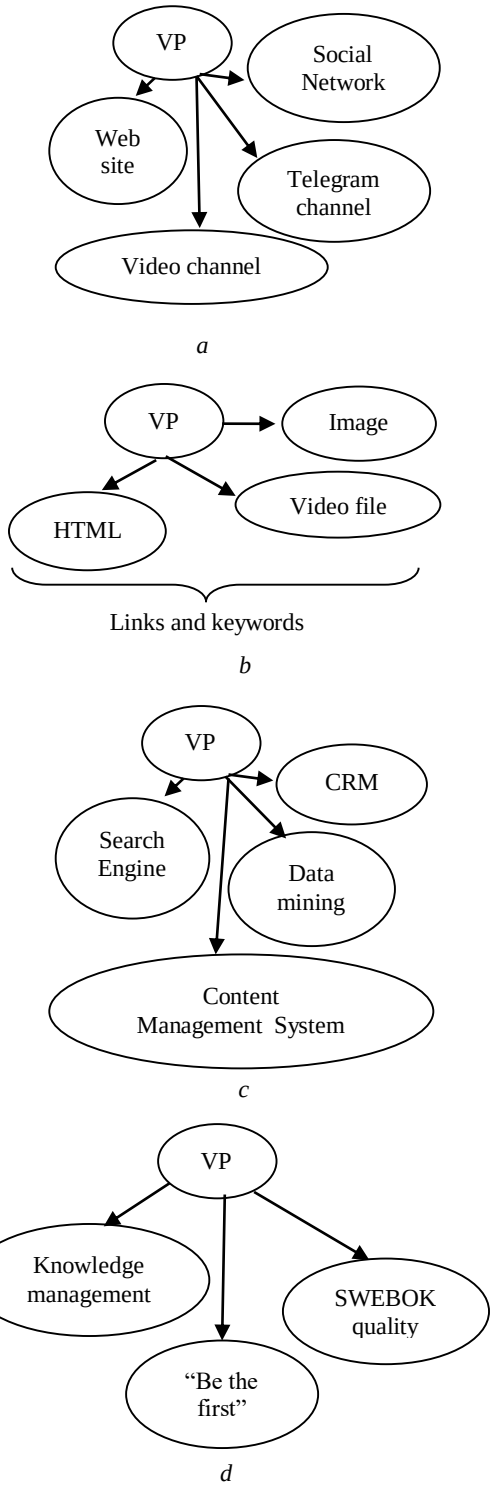


Fig. 2. VP views

Unstable structure. This is a new research object. Therefore, there is not a stable structure of such technology or its definition till this moment. Each business tries to build at will. As a result we have a black box (fig. 3);

Uncertain metrics. First of all, we should establish a relationship between the first positions in the search and sales. This connection provides a criterion according to which virtual promotion should be considered as effective

Since 2009, a study of virtual promotion has been carried out in more than 30 projects in Ukraine, USA, Europe and Canada. This study was carried out as part of the BINTECO startup. This study shows that virtual promotion is an independent object, or rather the field of knowledge of the enterprise, which it is ready to share with potential customers. That is, virtual promotion is corporate knowledge that the company is ready to transfer to the client using open communication channels so that the latter can make a decision on the purchase of a product or service. This is the link between corporate knowledge and customer needs.

Then the goal of managing virtual promotion is to increase the efficiency of enterprise sales based on Internet technologies and knowledge management. By structure, virtual promotion is a component of the sales process. As we know according to knowledge management theory sales process includes the following steps: order processing, delivery and analysis. We propose to consider the process as follows, fig. 3. First stage is text processing to extract necessary knowledge in a form of semantic kernel. On the next step we provide search engine optimization activity to attract potential clients to retrieve our knowledge. Finally we analyze the position in search list according to predefined criteria of quality.

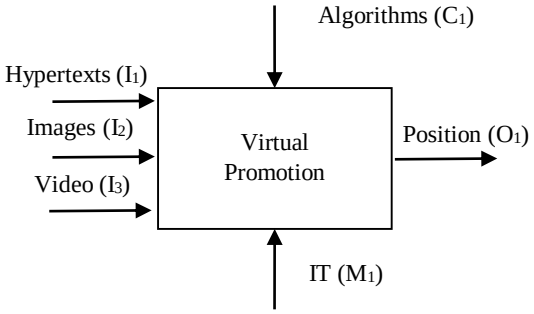


Fig. 3. VP black box

Based on the analysis of VP busness process the following tasks were selected:

Choose the sources of hypertexts. At the moment we have the following hypertext sources: Google news, web page, social network page, telegram (viber) stream. These sources were selected because it is possible to exctract the text automatically.

Knowledge representation and extraction. Next task is how to represent VP knowledge and then exctract it from selected source automatically. One of the best way to represent is a semantic net;

Semantic kernel building. Therefore, it is necessary to build special semantic net to describe VP knowledge. This net is named semantic kernel [1]. It is convenient form for further SEO process.

Software architecture selection. To support the business process performance the special software should

be developed. The software architecture is based on the technologies, methods and algorithms mentioned above.

Quality criteria selection and analysis. Finally, we should evaluate the efficiency of our business process in term of income, time and customer satisfaction.

Thus, a new object of study is highlighted – virtual promotion. This object is characterized by the following goal: to increase sales efficiency. Structurally, virtual promotion is part of the sales process. Fig. 4 shows the business process of virtual promotion, which allowed us to identify five tasks for solution. In addition, virtual promotion is characterized by input parameters (hypertext from open sources and sources within the enterprise). The output parameters are the position in the search list and the quality criteria similar to the software quality criteria. This is due to the fact that, according to the business process scheme, its components are information technologies implemented by various software. Therefore, we will consider virtual promotion as some kind of software that has its own development and implementation cycle.

Consider an example of the implementation of such software for a real company in Ukraine

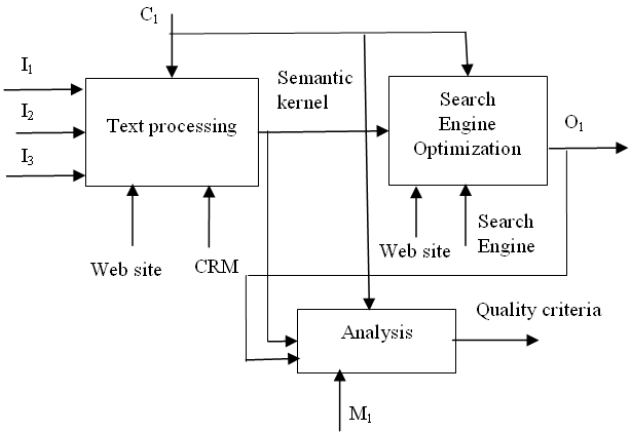


Fig. 4. VP business process

Solution. We assume that it is required to increase the efficiency of the sales process of a company that sells lumber. The standard distribution channels for lumber are shops, construction companies, and just citizens. Information channels for such a product are the Internet, rumors, recommendations and announcements in the newspaper. We assume that the main channel is the Internet. Then our task is to develop special software that visualizes knowledge about lumber (grade, dimensions, price, location, scope) on the first page in the search.

To implement VP business process, it was proposed to develop CRM system and WEB site. CRM system plays role of accounting for lumber in a warehouse, accounting for the process of interaction with customers, pricing policy, storage of description of lumber. But its main function, using the semantic kernel formation algorithm [1], is to form the last. Then the formed core is placed on the pages of the WEB site and the optimization process starts.

Software architecture of such IT solution is shown in fig. 5.

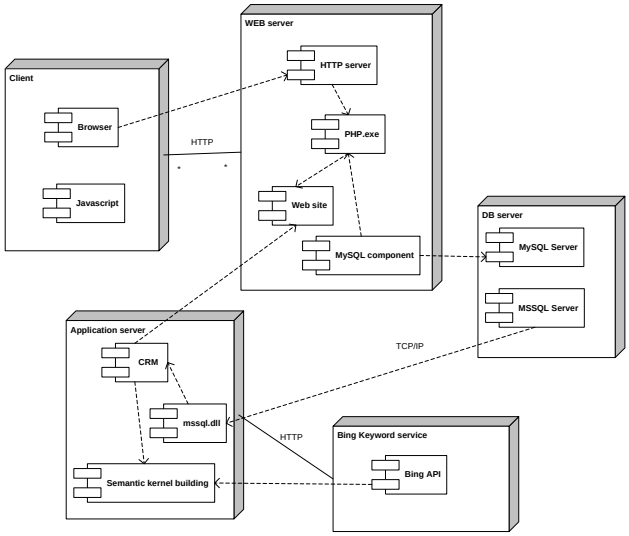


Fig. 5. Software architecture

An interesting point of this project was the fact that there were about five WEB sites that work with this CRM system. This made it possible to fill the first page of the search, which also guaranteed an increase in sales. Each WEB site has got personal semantic kernel.

Results. Over the course of ten years, more than thirty projects have been completed, the results of which confirmed the presence of a new research object – virtual promotion. Projects have been completed in the following application areas: marketing, lumber sales, cosmetics, auto spare parts sales, construction materials, metal–plastic windows, jewelry production [10─12].

All completed projects included architectural solution, software and organizational measures according to the ideology of knowledge management.

Summary. The performed scientific work allowed us to get some interesting results. The project presented in the field of lumber showed sales growth for the first year of implementation of 100%. Similar achievements were obtained for other projects. Now the share of virtual advancement in the business of this company is about 70%. The average time to go to the first page and get the first significant effect of virtual promotion is 3–4 months. All projects were carried out in different application areas, which prove the reliability of the proposed approach. All virtual promotions are available online.

Список литературы

1. Michael Godlevsky, Sergey Orekhov, Elena Orekhova. Theoretical Fundamentals of Search Engine Optimization Based on Machine Learning. *CEUR–WS*. США. 2017. № 1844, P. 23–32.
2. Sergey Orekhov, Henadii Malyhon, Irina Liutenko, Tetiana Goncharenko. Using Internet News Flows as Marketing Data Component. *CEUR–WS*. США. 2020. № 2604. P. 358–373.
3. Amy Shuen. Web 2.0: A Strategy Guide: Business thinking and strategies behind. США, O'Reilly Media, Inc., 2008. 266 p.
4. Ries, A. and Trout, J. Positioning, The battle for your mind. New York: McGraw-Hill Inc., 2001. 228 c.
5. Pierre Bourque, Richard E. SWEBOK. Guide to the Software Engineering Body of Knowledge. Version 3.0. США: IEEE Computer Society, 2014. 704 p.
6. Kotler F. A Framework for Marketing Management. США: Prentice–Hall Inc., 2001. 456 p.

7. Kotler F. Marketing Management. США: Pearson Education, 2009. 889 p.
8. Definitive Guide to Marketing Metrics and Analysis. США: Marketo Publ., 2011. 70 p.
9. Paine K. Introduction: The Evolution of Media Measurement. США: CyberAlert LLC Publ., 2014. 75 p.
10. Cherenkov I, Orekhov S. News data mining based on example of polymer market. *Information Processing Systems*. 2012. № 9 (107), P. 224–227.
11. Cherenkov I, Orekhov S. Approach for extracting events from news stream. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2013. Vol. 1, № 4 (61). P. 62–64.
12. Maryin I., Orekhov S. Overdraft agreement processing based on XML and its implementation in bank information system. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V. Publ., 2003. P. 121–130.

References (transliterated)

1. Michael Godlevsky, Sergey Orekhov, Elena Orekhova. Theoretical Fundamentals of Search Engine Optimization Based on Machine Learning. *CEUR WS*. USA. 2017, vol. 1844, pp. 23–32.
2. Sergey Orekhov, Henadii Malyhon, Irina Liutenko, Tetiana Goncharenko. Using Internet News Flows as Marketing Data Component. *CEUR WS*. USA. 2020, vol. 2604. pp. 358–373.
3. Amy Shuen. Web 2.0: A Strategy Guide: Business thinking and strategies behind. USA: O'Reilly Media, Inc., 2008. 266 p.
4. Ries, A. and Trout, J. Positioning, The battle for your mind. New York: McGraw-Hill Inc., 2001. 228 p.
5. Pierre Bourque, Richard E. SWEBOK. Guide to the Software Engineering Body of Knowledge. Version 3.0. USA: IEEE Computer Society Publ., 2014. 704 p.
6. Kotler F. A Framework for Marketing Management. USA: Prentice–Hall Inc., 2001. 456 p.
7. Kotler F. Marketing Management. USA: Pearson Education, 2009. 889 p.
8. Definitive Guide to Marketing Metrics and Analysis. USA: Marketo Publ., 2011. 70 p.
9. Paine K. Introduction: The Evolution of Media Measurement. USA: CyberAlert LLC Publ., 2014. 75 p.
10. Cherenkov I, Orekhov S. News data mining based on example of polymer market. *Information Processing Systems*. 2012, vol. 9 (107), pp. 224–227.
11. Cherenkov I, Orekhov S. Approach for extracting events from news stream. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2013, vol. 1, no. 4 (61), pp. 62–64.
12. Maryin I., Orekhov S. Overdraft agreement processing based on XML and its implementation in bank information system. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V. Publ., 2003, pp. 121–130.

Поступила (received) 16.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Орєхов Сергій Валерійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5040-5861; e-mail: sergey.v.orekhov@gmail.com

Малигон Геннадій Васильович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5448-2488; тел.: (057) 707-64-74; e-mail: gmalygon@gmail.com

Орехов Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии та информационных технологий управления; Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5040-5861; e-mail: sergey.v.orekhov@gmail.com

Малыгон Геннадый Васильевич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры программной инженерии та информационных технологий управления; Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5448-2488; тел.: (057) 707-64-74; e-mail: gmalygon@gmail.com

Orekhov Sergey Valerievich – PhD, Associate Professor, National Technical University «Kharkov Polytechnical Institute», Accosiate Professor of Software Engineering and Management Information Technologies department; Kharkov, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5040-5861; e-mail: sergey.v.orekhov@gmail.com

Malyhon Hennadiy Vasilievich – National Technical University «Kharkov Polytechnical Institute», Post graduate of Software Engineering and Management Information Technologies department; Kharkov, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5448-2488; тел.: (057) 707-64-74; e-mail: gmalygon@gmail.com

МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

УДК 621.3.01+621.38 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.14**

Ю. В. ГНУСОВ, П. С. КЛІМУШИН, Т. П. КОЛІСНИК, М. О. МОЖАЄВ

АНАЛІЗ СИСТЕМ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ З ДОДАТКОВИМИ МОДУЛЯМИ КРИПТОГРАФІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

Сфера застосування захищених мікропроцесорних систем складається з забезпечення функції інформаційної безпеки: автентіфікації суб'єктів і об'єктів інформаційної взаємодії, шифрування інформації, контроля цілісності, управління доступом, управління ключами. Сьогодні актуальним завданням є визначення захищеності мікропроцесорних систем з допомогою використання різних програмних середовищ комп'ютерного моделювання. В роботі проаналізовано найбільш ефективні та доступні програми комп'ютерного моделювання мікропроцесорних систем та надано практичні рекомендації щодо їх використання. Показано,що найбільш потужною системою автоматизованого проектування вважається програмний пакет Proteus, який дозволяє віртуально змоделювати роботу різних мікропроцесорних пристроїв з підтримкою декількох сімейств мікроконтролерів від різних виробників. До основних переваг відносяться: виконання всіх етапів розробки в єдиному середовищі; можливість написання, налагодження і тестування мікропрограмного забезпечення, генерування діагностичних повідомлень з пошуку помилки програмування; прискорення процесу розробки мікропроцесорного пристрою; підтримка спільної роботи з апаратними пристроями, що підключені через порт комп'ютера. Використання Multisim в навчальному процесі дає можливість: переглядати і змінювати стан вмісту регістрів, пам'яті програм і даних, осередків стека і біта конфігурації; візуалізувати результат виконання окремої команди або програми в цілому; демонструвати практику спільного застосування мов С і Асемблер в одному проекті з метою оптимізації програми; вивчати основи роботи і особливості функціонування периферійних пристроїв. Проте обмежений набір мікроконтролерів в програмі Multisim накладає суттєві обмеження на можливість її використання при розробці реальних проектів. Програма комп'ютерного моделювання TINA має значно простіший русифікований інтерфейс у порівнянні з Proteus VSM з можливістю укладення всієї інформації про створений проект в одному файлі. У порівнянні з Multisim бібліотека TINA містить значно більше моделей мікроконтролерів, а вбудований програматор дозволяє модифікувати програми та спостерігати результати.

Ключові слова: моделювання, мікроконтролери, мікропроцесорна система, криптографічний захист інформації, кібербезпека, Proteus, Multisim, TINA.

Ю. В. ГНУСОВ, П. С. КЛИМУШИН, Т. П. КОЛЕСНИК, М. А. МОЖАЕВ

АНАЛИЗ СИСТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ МОДУЛЯМИ КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Сегодня актуальной задачей является определение защищенности микропроцессорных систем с помощью использования различных программных сред компьютерного моделирования. В работе проанализированы наиболее эффективные и доступные программы компьютерного моделирования микропроцессорных систем и даны практические рекомендации по их использованию. Показано, что наиболее мощной системой автоматизированного проектирования является программный пакет Proteus, который позволяет виртуально смоделировать работу различных микропроцессорных устройств с поддержкой нескольких семейств микроконтроллеров от разных производителей. К основным преимуществам относятся: выполнение всех этапов разработки в единой среде; возможность написания, отладки и тестирования микропрограммного обеспечения, генерирования диагностических сообщений по поиску ошибки программирования; ускорение процесса разработки микропроцессорного устройства; поддержка совместной работы с аппаратными устройствами, которые подключены через порт компьютера. Использование Multisim в учебном процессе дает возможность: просматривать и изменять состояние содержимого регистров, памяти программ и данных, ячеек стека и бита конфигурации; визуализировать результат выполнения отдельной команды или программы в целом; демонстрировать практику совместного применения языков С и Ассемблер в одном проекте с целью оптимизации программы; изучать основы работы и особенности функционирования периферийных устройств. Программа компьютерного моделирования TINA имеет простой русифицированный интерфейс по сравнению с Proteus с возможностью заключения всей информации о созданном проект в одном файле. По сравнению с Multisim библиотека TINA содержит значительно больше моделей микроконтроллеров, а встроенный программатор позволяет модифицировать программы и наблюдать результаты.

Ключевые слова: моделирование, микроконтроллеры, микропроцессорная система, криптографическая защита информации, кибербезопасность, Proteus, Multisim, TINA.

Yu. V. GNUSOV, P. S. KLIMUSHYN, T. P. KOLISNYK, M. O. MOZHAIEV

ANALYSIS OF SYSTEMS OF MODELING OF MICROCONTROLLERS WITH ADDITIONAL MODULES OF CRYPTOGRAPHIC INFORMATION PROTECTION

The field of application of the protected microprocessor systems includes information security functions: authentication of subjects and objects of information interaction, information encryption, integrity control, access control, key management. Today, the urgent task is to establish the security of microprocessor-based systems using a variety of computer simulation software environments. The work analyzes the most effective and affordable

© Ю. В. Гнусов, П. С. Клімушин, Т. П. Колісник, М. О. Можаєв, 2020

computer simulation programs for microprocessor systems and gives practical recommendations for their use. It has been shown that the most powerful computer-aided design system is the Proteus software suite which allows simulating virtually the operation of various microprocessor devices with support for several microcontroller families from different manufacturers. The main advantages include: performing all stages of development in a single environment; the ability to write, debug, and test firmware, generate diagnostic messages to find programming errors; accelerating the development of a microprocessor device; support for interoperation of hardware devices that are connected through a computer port. Using Multisim in the educational process makes it possible to: review and change the status of the register content, program memory and data, stack cells and bit configuration; visualize the result of the execution of a single command or a program as a whole; demonstrate the practice of joint use of languages C and Assembler in one project in order to optimize the program; to study the basics of operation and features of peripheral devices functioning. However, the limited set of microcontrollers in the Multisim program imposes significant restrictions on the possibility of using it for development of real projects. The computer simulation program TINA has a russified interface that is much easier compared to the Proteus with an ability to enter all the information about the created project into one file. Compared to Multisim, the TINA library contains significantly more microcontroller models, and the built-in programmer allows modifying programs and observing the results.

Keywords: modeling, microcontrollers, microprocessor system, cryptographic information protection, cybersecurity, Proteus, Multisim, TINA.

Вступ. Сучасну мікроелектроніку важко уявити без такої важливої складової, як мікроконтролери (МК). Мікроконтролерні технології дуже ефективні, так як один і те ж пристрій, який раніше збирався на традиційних елементах, будучи зібраний з застосуванням мікроконтролерів, стає простішим. Використання мікроконтролерів не вимагає складних розрахунків апаратної частини, її регулювання і вона менше за розмірами. Крім того, із застосуванням мікроконтролерів з'являються практично безмежні можливості по додаванню нових споживчих функцій, а також забезпечення безпеки їх функціонування. Досить просто поміняти програму або мікропрограму.

Моделювання в електроніці зводиться до вирішення групи задач синтезу і задач аналізу. При цьому під *синтезом* розуміють створення якогось варіанта схеми, не обов'язково остаточного. До *задач аналізу* входить вивчення властивостей схеми за заданою в результаті синтезу її структури, характеру вхідних компонентів і їх параметрів. В процесі модулювання синтез як задача може виконуватися багато разів, чергуючись з вирішенням задач аналізу.

Одним з найбільш популярних наборів мікроконтролерів, які застосовуються в системах оброблення даних, контролю і управління та кібербезпеки є пристрої, що випускаються фірмою Microchip та відомі під абревіатурою PIC. Наряду з цім, останнім часом корпорація Atmel (США) стала виробляти набір мікросхем на ядрі AVR, яке має більш досконалу архітектуру й забезпечує МК цього набору високу швидкодію та низьке енергоспоживання, що дає їм відчутну перевагу, порівняно з контролерами PIC. До того ж, цінова політика корпорації Atmel є більш привабливою для розробників таких систем. Порівняно з пристроями PIC, МК AVR мають більш розвинену систему команд, що налічує до 133 інструкцій, а flash-пам'ять програм має можливість внутрішньосхемного програмування. Архітектура ядра AVR оптимізована так, що дозволяє використовувати мову високого рівня С.

Для задач, у яких вимоги до захисту інформації особливо високі – смарт-карти, електронна комерція, автентифікація користувачів, шифрування даних, фірма Atmel пропонує спеціалізовані мікроконтролери – зокрема, сім'ї SecureAVR, які поєднують звичайне AVR-ядро з додатковими модулями для підтримки криптографічних операцій та підвищення фізичної захищеності мікросхем до різного роду атак. Отже, вивчення мікроконтролерів AVR забезпечує додаткові переваги спеціалістам з інформаційної безпеки.

Сфера застосування захищених криптографічних мікроконтролерів складається з забезпечення функції інформаційної безпеки: автентіфікації суб'єктів і об'єктів інформаційної взаємодії, шифрування інформації, контролю цілісності, управління доступом, управління ключами [1].

Під захищеними криптографічними мікроконтролерами розуміються спеціалізовані напівпровідникові пристрої, що мають на кристалі, крім стандартного процесорного ядра, додаткові апаратні блоки – криптографічні акселератори. Такі апаратні акселератори необхідні для значного прискорення виконання складних криптографічних операцій – генерації випадкових чисел, шифрування і розшифрування, формування і перевірки електронного підпису тощо.

Застосування комп'ютерного моделювання мікропроцесорних систем в даний час є *актуальним завданням*, рішення якого можна з використанням різних програмних середовищ. Сьогодні в світової практиці застосовується широкий спектр програмних середовищ комп'ютерного моделювання. До них, перш за все, слід віднести такі програми як Proteus VSM, NI Multisim, TINA.

Аналіз літератури. Приклади використання програм комп'ютерного модулювання електронних схем в своїх наукових працях надають національні та закордонні автори: Алехин В. А. [2,3] – визначає розвиток навчальних комплексів з моделювання по електротехніці, електроніці та мікроконтролерам в середовище TINA; Березняков С. В., Греков А. В. [4], Матвеенко І. П. [5] та Филатов М. [6] – надають приклади моделювання мікроконтролерів в системі моделювання Proteus; Макаренко В., Бабко А. [7], Найденко Е. В. [8] та Колесникова Т. [9], Квашнін В. О., Бабаш А. В., Квашнін В. В. [10] – визначають елементи моделювання роботи мікроконтролерів у програмі Multisim; Ляшенко О, Журіло О. [11], Совин Я. Р., Наконечний Ю. М., Опірський І. Р., Стахів М. Ю. [1] – аналізують моделювання можливих загроз інформаційної безпеки в системах з використанням мікроконтролерів та багато інших.

В цілому аналіз цих робіт показує, що проблема використання програмних середовищ моделювання мікропроцесорних систем досконально ще не досліджена і має мінливий характер в залежності від етапів їх розвідку та кон'юнктури ринку мікроконтролерів.

Обираючи інструментальні засоби моделювання, доцільно брати до уваги: підтримку можливо більшої кількості мікроконтролерів; різноманітність вбудованих інтерфейсів (RS-232, IEEE1284/LPT, USB) та додаткових компонентів, що розширюють функціональні можливості; наявність на платі поля для макетування і контактів для безпосереднього підключення

до виводів приладу; можливість підключення додаткових модулів; універсальне живлення.

Метою статті є визначення найбільш ефективних та доступних програм комп'ютерного моделювання мікропроцесорних систем та надання практичних рекомендацій щодо їх застосування.

Система автоматизованого проектування Proteus. Аналіз цих праць свідчить, що найбільш потужною системою автоматизованого проектування вважається програмний пакет Proteus VSM, який дозволяє віртуально змоделювати роботу різних мікропроцесорних пристроїв. Програма Proteus VSM є симулятором наскрізного проектування, що має на увазі створення пристрою, починаючи з графічного зображення і закінчуючи виготовленням друкованої плати пристрою.

Proteus VSM складається з двох самостійних програм: ISIS – програма синтезу та моделювання безпосередньо електронних схем і ARES – програма розробки друкованих плат. Крім того, до складу восьмої версії входить інтегроване середовище розробки VSM Studio, що містить у собі текстовий редактор з підсвічуванням синтаксису, компілятор асемблера, симулятор, налагоджувач й інтерфейс із апаратними емуляторами та дозволяє швидко написати програму для мікроконтролера, використовуваного в проекті, і здійснити компіляцію [4].

При розробці програмного забезпечення мікроконтролерів необхідно звернути увагу на безкоштовні програмні засоби (AVR Studio, WinAVR) підтримки проектування та налагодження систем на мікроконтролерах AVR, робота з якими економить гроші та забезпечує ліцензовану чистоту кінцевого програмного продукту.

Останнім часом усе популярніше стає використання компіляторів мов високого рівня при написанні програм для МК. Найбільше поширення при цьому одержали компілятори мови С з можливістю оптимізації коду, оскільки в цій мові найбільш просто реалізуються всі необхідні можливості з керування апаратними засобами МК. Крім С при розробці програмного забезпечення для МК застосовуються й інші мови високого рівня. Так, для МК сімейства AVR існують також компілятори мов Basic, Pascal і Forth.

Proteus підтримує наступні етапи розробки: розробка схеми електричної принципової (введення в графічному редакторі); моделювання схеми з використанням різноманітних віртуальних приладів; розробка друкованої плати, включаючи 3D-візуалізацію її збірки.

В Proteus реалізовані таки можливості налагодження мікропрограмного забезпечення: спільне моделювання роботи мікроконтролера, виконуючого задану програму, і оточуючих його аналогової і цифрової схем; широкі налагоджувальні можливості, в т.ч. доступ до вмісту регістрів і пам'яті, завдання точок зупинки програми, покрокове виконання; налагодження на рівні вихідного коду (С, Бейсік, Асемблер, в залежності від типу використовуваного для налагодження файлу з випробовуваним мікропрограмним забезпеченням); підтримка декількох сімейств мікроконтролерів від різних виробників, в т.ч.: PIC12, PIC16, PIC18 і PIC24 (Microchip); 8051/8052, в т.ч. похідні від них, що випускаються Philips і Atmel; AVR, Tiny AVR і Mega AVR (Atmel); ARM7, в т.ч. LPC2000 (NXP); HC11 (Freescale) і мікроконтролерні модулі BASIC Stamp (Parallax); ведеться робота по додаванню підтримки інших МК.

До переваг використання Proteus відносяться: виконання всіх етапів розробки електронного пристрою на основі мікроконтролера в єдиному середовищі; можливість написання, налагодження і тестування мікропрограмного забезпечення, ще до фізичного виготовлення дослідного зразка системи; генерування діагностичних повідомлень (наприклад, при виконанні непередбачуваної інструкції) як з боку процесорного управління, так і з боку моделей пристроїв введення-виведення, що дозволяє виявити складні в пошуку помилки програмування; прискорення процесу розробки електронного пристрою; підтримка спільної роботи з апаратними пристроями, що підключені через порт комп'ютера.

Є демонстраційна версія яку можна використовувати для навчальних закладів з обмеженням (рис.1): неможливість збереження проекту та його друку; неможливість створення своїх власних схем на основі МК, проте після відкриття існуючих схем є можливість змінити програму, виконувану мікроконтролером, і поспостерігати результат її виконання.



Рис. 1. Стартова сторінка демоверсії Proteus

Таким чином, використовуючи інтегровану середу AVR Studio і демонстраційну версію програми Proteus, з'являється можливість досить легко, з найменшими матеріальними і тимчасовими витратами, спроектувати мікропроцесорну систему, що включає будь-якій мікроконтролер, провести її налагодження і розводку плати і тільки потім створювати реальний пристрій [5, 6].

Програма NI Multisim. Традиційно в лабораторних практикумах вузів застосовують програми Electronics Workbench і Multisim компанії National Instruments (NI). Програма NI Multisim має простий наочний інтерфейс, потужні засоби графічного аналізу результатів моделювання, наявність віртуальних вимірювальних приладів, які копіюють реальні аналоги.

Крім того, NI Multisim дозволяє перетворити будь-яку електричну схему в простий процес, з можливістю додати будь-який елемент в схему. Версія

NI Multisim Student Edition призначена для навчальних закладів і включає в себе навчальні курси, підготовлені апаратні рішення і робочі підручники (рис. 2). Однак ця версія також вимагає придбання ліцензійного програмного забезпечення.

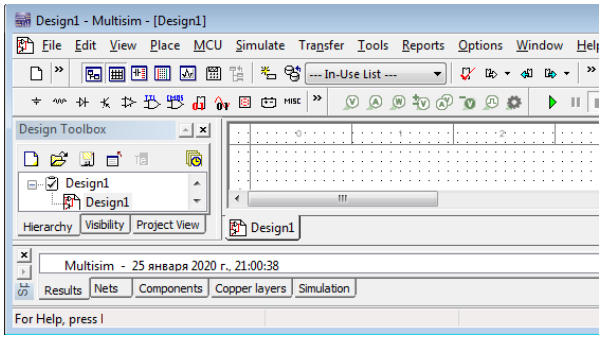


Рис. 2. Стартова сторінка Multisim Student Edition

Програмне середовище NI Multisim 14 містить програмний модуль MCU, що дозволяє моделювати програмовані цифрові пристрої на основі восьмирозрядних мікроконтролерів MCS-51 і PIC-16 фірми Microchip, а також компілятори з мови С і Ассемблер зазначених мікроконтролерів. Ці мікроконтролери мають традиційну архітектуру, загальну систему команд і розширені периферійні функції, що дозволяє широко застосовувати їх в світовому мікропроцесорному ринку завдяки оптимального поєднання ціни і можливостей.

Використання Multisim в навчальному процесі дає можливість [8]:

– переглядати і змінювати стан вмісту регістрів, пам'яті програм і даних, осередків стека і біта конфігурації, що сприяє розумінню і кращому засвоєнню принципів роботи і архітектури мікроконтролерів;

– візуалізувати результат виконання окремої команди або програми в цілому, підвищуючи наочність викладеного матеріалу;

– наводити приклади практичного застосування, активізуючи інтерес до дисципліни;

– демонструвати практику спільного застосування мов С і Асемблер в одному проекті з метою оптимізації програми;

– вивчати основи роботи і особливості функціонування периферійних пристроїв, використовуючи їх моделі з бази даних Multisim;

– коригувати зміст навчального матеріалу з урахуванням особливостей аудиторії.

Бібліотека Multisim містить групу електромеханічних моделей, що дає можливість вводити в лабораторний практикум міжпредметних компонент і створювати комплексні лабораторні роботи і приклади демонстраційних схем при наскрізному інформаційному навчанні з суміжних дисциплін одночасно, що істотно підвищує ефективність засвоєння матеріалу, що викладається.

З огляду простоти і зручності використання Multisim є найбільш прийнятним засобом для освоєння основних прийомів проектування мікропроцесорних систем. Застосування Multisim в процесі навчання сприяє підвищенню якості освіти та виробленню необхідних професійно-схемотехнічних компетентностей, а також дає можливість рекомендувати його для розробки курсу інтерактивного навчання.

Проте обмежений набір мікроконтролерів в програмі NI Multisim накладає суттєві обмеження на можливість її використання при розробці реальних проектів. З вищевикладеного можна зробити висновок про те, що використовувати програму NI Multisim доцільно на етапі навчання програмування мікроконтролерів на мові С або Асемблер. Всі необхідні для налагодження засоби встановлюються автоматично при інсталяції NI Multisim або є їх дистрибутиви, що знаходяться в папці з встановленою програмою і у користувача немає необхідності пошуку і встановлення додаткового програмного забезпечення. А на сьогоднішній день, мабуть, найкращою програмою для моделювання мікроконтролерів при вивченні їх можливостей і розробки пристроїв з їх застосуванням є Proteus. [7].

Програмне середовище TINA. В останні роки з'явилася нова ефективна програма комп'ютерного моделювання TINA, яка містить інтегровану частину для проектування друкованих плат, має значно простіший інтерфейс у порівнянні з Proteus VSM, який легко освоюється студентами. Крім того, вся інформація про створений проект укладена в одному файлі, який можна переслати і відкрити на іншому комп'ютері для продовження моделювання або перевірки роботи студентів. Наряду з цим, програма має русифікований інтерфейс, що значно підвищує ефективність засвоєння навчального матеріалу (рис. 3).

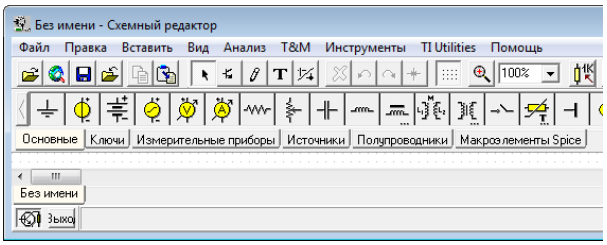


Рис. 3. Стартова сторінка програми TINA

Програма розробляється спільними зусиллями співробітників компаній Texas Instruments і DesignSoft. TINA є потужним інструментом для моделювання електронних схем та мікроконтролерів, дозволяє проводити дослідження схем при зміні параметрів, оптимізації, виконувати частотний і спектральний аналіз, досліджувати перехідні характеристики тощо. У порівнянні з Multisim бібліотека TINA містить значно більше моделей мікроконтролерів – більше 1000, які можна програмувати на Асемблері і на мові С, моделювати, налагоджувати в змішаних схемах. Вбудований програматор дозволяє модифікувати програми та спостерігати результати.

Можливість використання безкоштовної і досить ефективної версії TINA-TI робить цю програму дуже корисною для освіти. Наряду з цим, для мобільного навчання компанія DesignSoft пропонує новий програмний продукт TINACloud [12], який використовує хмарні інтернет-технології і може запускатися через браузер на вашому пристрої. Це багатомовна онлайн-

версія популярного програмного забезпечення TINA, на яку можна підписатися за частку ціни TINA (студентська ліцензія на рік 12 євро). Цей сервіс пропонує безліч освітніх ресурсів і можливість виконання віртуального дослідження і лабораторного практикуму по мікропроцесорної техніки.

Аналіз результатів робіт професора Алехина В. А. показує високу ефективність використання програм TINA та TINACloud в начальному процесі. Ефективність цієї програми підтверджує створений автором навчальний комплекс з електротехніки, електроніки та мікроконтролерів [2, 3].

При застосуванні програми TINA в налагодженні завдань програмування та інтерактивного моделювання пристроїв на мікроконтролерах доцільно вибрати популярні мікроконтролери PIC16F84A і PIC16F877A компанії Microchip Technology Incorporated, так як Microchip надає безкоштовну інтегровану програмну середу розробки мікроконтролерів MPLAB IDE, яка дозволяє писати, налагоджувати, оптимізувати текст програми, включає в себе редактор тексту, симулятор і менеджер проектів, підтримує роботу емуляторів, програматорів і інших налагоджувальних засобів. Щоб полегшити програмування на С поєднання мікроконтролерів з зовнішніми периферійними пристроями, доцільно використовувати середу mikroC PRO for PIC v.6.5.0 компанії MikroElektronika, яка також є безкоштовної при умовах HEX-файлу проекту менш 2 кбайт, що є достатнім в навчальних завданнях.

Висновки. На підставі проведеного аналізу можна відзначити чітку тенденцію щодо апаратної підтримки криптографічних операцій та підвищення фізичної захищеності мікросхем до різного роду атак.

Використання захищених криптографічних мікроконтролерів дає змогу підняти швидкодію шифрування AES в 10-20 разів для 8/16-бітових МК та до 150 разів для 32-бітових МК порівняно з програмними реалізаціями алгоритму. Зростання швидкодії обчислення хеш-алгоритмів SHA-1, SHA-256 у 32-бітових МК становить більше ніж в 100 разів, а для криптографічних хеш-алгоритмів HMAC наближається до 500.

У 32-бітових мікроконтролерах спостерігається тренд до впровадження комплексних рішень безпеки, які б не тільки пришвидшували широке коло симетричних і асиметричних алгоритмів і протоколів, але і надавали можливість захищеного зберігання та генерування ключів, безпечного завантаження і оновлення коду, підтримки електронних підписів та сертифікатів.

В результаті проведених досліджень було визначено, що для моделювання мікропроцесорних систем на мікроконтролерах доцільно використовувати наступні програми: Proteus VSM, NI Multisim, TINA.

Порівняльний аналіз цих програм комп'ютерного моделювання з точки зору їх доступності, простоти освоєння й ефективності застосування викладачами і студентами в навчальному процесі засвідчив.

Найбільш потужною системою автоматизованого проектування вважається програмний пакет Proteus VSM, який дозволяє віртуально змоделювати роботу різних мікропроцесорних пристроїв з підтримкою декількох сімейств мікроконтролерів від різних виробників.

До основних переваг відносяться: виконання всіх етапів розробки в єдиному середовищі; можливість написання, налагодження і тестування мікропрограмного забезпечення, генерування діагностичних повідомлень з пошуку помилки програмування; прискорення процесу розробки мікропроцесорного пристрою; підтримка спільної роботи з апаратними пристроями, що підключені через порт комп'ютера.

Використання Multisim в навчальному процесі дає можливість: переглядати і змінювати стан вмісту регістрів, пам'яті програм і даних, осередків стека і біта конфігурації; візуалізувати результат виконання окремої команди або програми в цілому; демонструвати практику спільного застосування мов С і Асемблер в одному проекті з метою оптимізації програми; вивчати основи роботи і особливості функціонування периферійних пристроїв. Проте обмежений набір мікроконтролерів в програмі Multisim накладає суттєві обмеження на можливість її використання при розробці реальних проектів.

Програма комп'ютерного моделювання TINA має значно простіший русифікований інтерфейс у порівнянні з Proteus VSM з можливістю укладення всієї інформації про створений проект в одному файлі. У порівнянні з Multisim бібліотека TINA містить значно більше моделей мікроконтролерів, а будований програматор дозволяє модифікувати програми та спостерігати результати.

Можливість використання безкоштовної версії TINA-TI та наявність онлайн-версії TINACloud з використанням хмарних технологій робить цю програму дуже корисною для освіти. Веб-сервіс пропонує безліч освітніх ресурсів і можливість виконання віртуального дослідження і лабораторного практикуму по мікропроцесорної техніки.

Предметом подальших досліджень є модулювання процесів використання криптографічних акселераторів у мікроконтролерах загального призначення.

Список літератури

1. Совин Я. Р., Наконечний Ю. М., Опірський І. Р., Стахів М. Ю. Аналіз апаратної підтримки криптографії у пристроях інтернету речей. Ukrainian Scientific Journal of Information Security, 2018, vol. 24, issue 1, p. 36–48.
2. Алехин В. А. Развитие учебного комплекса по электротехнике, электронике и микроконтроллерам с моделированием в программной среде TINA. Открытое образование. 2017. №6. С. 57–69.
3. Алехин В. А. Электротехника и электроника. Учебные ресурсы для студентов и преподавателей. URL: http://www.toe-mirea.ru/ (дата звернення 02.02.2020).
4. Березняков С. В., Греков А. В. Моделирование микроконтроллера 80C51 в системе схемотехнического моделирования Proteus VSM. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2016. № 17. С. 104–120.
5. Матвеенко И. П. Компьютерное моделирование электронных схем на базе микроконтроллеров AVR. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК. 2014. Вип. 194(2). С. 39–46.
6. Филатов М. Работа с микроконтроллерами AVR в программной среде Proteus 8.1. Компоненты и технологи. 2015. №12(173). С. 103–112.
7. Макаренко В., Бабко А. Моделирование работы микроконтроллеров в программе NI Multisim. Электронные компоненты и системы. 2012. №4. С. 38–43.

8. Найденко Е. В. Применение программной среды Ni Multisim при изучении дисциплины «Микропроцессорная техника». Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2017. № 25. С. 465–469.
9. Колесникова Т. Программирование микроконтроллеров в программной среде NI Circuit Design Suite –Multisim 12.0. Компоненты и технологи. 2014. № 6 (155). С. 144–148.
10. Ляшенко О, Журіло О. Моделювання можливих загроз інформаційної безпеки в системах з використанням мікроконтролерів AVR. Global Cyber Security Forum : матеріали першого міжнародного науково-практичного форуму, 14–16 листопада 2019 р. Харків: ХНУРЭ, 2019. С. 68–69.
11. Квашнін, В. О., Бабаш А. В., Квашнін В. В. Програмування та застосування мікроконтролерів STM32F4Discovery: монографія. Краматорськ: ЦТРІ «Друкарський дім», 2017. 143 с.
12. TinaCloud. URL: http://www.tinacloud.com (дата звернення 02.02.2020).

References (transliterated)

1. Sovyn Ya., Nakonechny Yu., Opirskyy I., Stakhiv M. Analysis of hardware support of cryptography in Internet of Things-devices. Ukrainian Scientific Journal of Information Security, 2018, vol. 24, issue 1, p. 36–48.
2. Alekhin V. Development of a training complex in electrical engineering, electronics and microcontrollers with modeling in the TINA software environment. Open education. 2017, no.6, pp. 57–69.
3. Alekhin V. A. Electrical Engineering and Electronics. Training resources for students and teachers. URL: http://www.toe-mirea.ru/ (accessed 02.02.2020).
4. Bereznyakov S., Grekov A. Modeling of the microcontroller 80C51 in the system of circuit simulation Proteus VSM. Electrical engineering, information technology, control systems. 2016, no. 17, pp. 104–120.
5. Matveenko I. Computer simulation of electronic circuits based on AVR microcontrollers. Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: APC Engineering and Energy. 2014, issue 194 (2), pp. 39–46.
6. Filatov M. Working with AVR Microcontrollers in Proteus 8.1. Components and technologies. 2015, no. 12 (173), pp. 103–112.
7. Makarenko V., Babko A. Modeling the operation of microcontrollers in the NI Multisim program. Electronic components and systems. 2012, no.4, pp. 38–43.
8. Naidenko E. Application of the NI Multisim software environment in the study of the discipline «Microprocessor Technology». Electrotechnical and computer systems. 2017, no. 25, pp. 465–469.
9. Kolesnikova T. Microcontroller programming in NI Circuit Design Suite - Multisim 12.0 software environment. Components and technologies. 2014, no. 6 (155), pp. 144–148.
10. Liashenko O., Zhurilo O. Simulation of possible information security threats in systems using AVR microcontrollers. Global Cyber Security Forum: Proceedings of the First International Scientific and Practical Forum, November 14–16, 2019. Kharkiv: KNURE, 2019, pp. 68–69.
11. Kvashnin, V.O., Babash A.V., Kvashnin V.V. Programming and Application of STM32F4Discovery Microcontrollers: Monograph. Kramatorsk: Center for Printing House, 2017. 143 p.
12. TinaCloud. URL: http://www.tinacloud.com (accessed 02.02.2020).

Надійшла (received) 26.02.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гнусов Юрій Валерійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет внутрішніх справ, завідувач кафедри інформаційних технологій та кібербезпеки; м. Харків, Україна; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9017-9635 e-mail: duke6969@i.ua

Клімушин Петро Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет внутрішніх справ, доцент кафедри інформаційних технологій та кібербезпеки; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1020-9399; e-mail: klimushyn@ukr.net

Колісник Тетяна Петрівна – кандидат педагогічних наук, доцент, Харківський національний університет внутрішніх справ, доцент кафедри інформаційних технологій та кібербезпеки; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7442-8136; e-mail: ktp201505@gmail.com

Можаєв Михайло Олександрович – кандидат технічних наук, Харківський Науково-Дослідний Інститут Судових Експертиз ім. засл. проф. М. С. Бокаріуса, завідувач сектору комп'ютерно-технічних та телекомунікаційних досліджень; м. Харків, Україна; ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1566-9260; e-mail: mikhail.mozhayev@hniise.gov.ua

Гнусов Юрий Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет внутренних дел, заведующий кафедрой Информационных технологий и кибербезопасности; г. Харьков, Украина; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9017-9635 e-mail: duke6969@i.ua

Климушин Петр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет внутренних дел, доцент кафедры Информационных технологий и кибербезопасности; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1020-9399; e-mail: klimushyn@ukr.net

Колесник Татьяна Петровна – кандидат педагогических наук, доцент, Харьковский национальный университет внутренних дел, доцент кафедры Информационных технологий и кибербезопасности; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7442-8136; e-mail: ktp201505@gmail.com

Можаев Михаил Александрович – кандидат технических наук, Харьковский научно-исследовательский Институт Судебных Экспертиз им. засл. проф. Н. С. Бокариуса, заведующий сектором Компьютерно-технических и телекоммуникационных исследований; г. Харьков, Украиина; ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1566-9260; e-mail: mikhail.mozhayev@hniise.gov.ua

GnusovYurii Valeriiovych – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Kharkiv National University of Internal Affairs, Head of the Department of Information Technologies and Cybersecurity; Kharkiv, Ukraine; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9017-9635 e-mail: duke6969@i.ua

Klimushyn Petro Sergeevich – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Kharkiv National University of Internal Affairs, Associate Professor of Information Technology and Cybersecurity Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1020-9399; e-mail: klimushyn@ukr.net

Kolisnyk Tetiana Petrivna – Candidate of Pedagogical Sciences (PhD), Kharkiv National University of Internal Affairs, Associate Professor of Information Technology and Cybersecurity Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7442-8136; e-mail: ktp201505@gmail.com

MozhaievMykhailo Oleksandrovych Candidate of Technical Sciences (PhD), Hon. Prof. M. S. Bokarius Kharkiv Research Institute of Forensic Examinations, Head of the Computer-technical and Telecommunications Research Sector; Kharkiv, Ukraine; ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1566-9260; e-mail: mikhail.mozhayev@hniise.gov.ua

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

INFORMATION TECHNOLOGY

УДК 004.932 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.15**

А. Л. УЛЬЯНКО, Ю. И. ДОРОФЕЕВ

ОБЗОР МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ

Рассматривается задача распознавания эмоционального состояния человека по изображению. Приведен обзор основных способов описания человеческих эмоций: разделение на конечное число классов и использование векторного описания. Представлены существующие разработки в области распознавания эмоций по изображению, а также приведен общий алгоритм работы подобных систем. Основными этапами решения задачи распознавании эмоций являются поиск лица на изображении и классификация эмоции. Информационная технология распознавания эмоций представлена в графической нотации. Описаны принципы работы алгоритма Виолы-Джонса, который используется для определения лица человека на изображении Представлены подходы, которые применяются для решения задачи классификации: алгоритм Виолы-Джонса, метод опорных точек, различные архитектуры нейронных сетей, которые предназначены для классификации изображений. Проанализированы преимущества и недостатки метода опорных точек, базирующегося на системе кодирования лицевых движений, а также способ применения алгоритма Виолы-Джонса для классификации эмоций. Рассмотрен метод распознавания эмоционального состояния человека на основании визуальной информации с применением сверточных нейронных сетей. Описаны принципы действия сверточных, субдискретизирующих и полносвязных слоев нейронной сети. На основе анализа опубликованных работ приведены результаты точности распознавания в различных условиях. Также представлены работы, в которых для анализа эмоционального состояния применяется комбинация сверточных и рекуррентных нейронных сетей, где кроме визуальной информации используется дополнительный источник – аудиопоток, что позволяет более эффективно классифицировать эмоции в видеопотоке. Представлены наиболее популярные обучающие выборки данных для решения рассмотренной задачи.

Ключевые слова: распознавание эмоций, классификация, метод опорных точек, сверточная нейронная сеть, рекуррентная нейронная сеть, обучающая выборка.

А. Л. УЛЬЯНКО, Ю. І. ДОРОФЄЄВ

ОГЛЯД МЕТОДІВ АВТОМАТИЧНОГО РОЗПІЗНАННЯ ЕМОЦІЙНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ ПО ЗОБРАЖЕННЮ

Розглядається задача розпізнавання емоційного стану людини по зображенню. Наведено огляд основних способів опису людських емоцій: поділ на кінцеве число класів і використання векторного опису. Представлені існуючі розробки в області розпізнавання емоцій по зображенню, а також наведено загальний алгоритм роботи подібних систем. Основними етапами у рішенні задачі розпізнавання емоцій є пошук обличь на зображенні і класифікація емоції. Інформаційна технологія розпізнавання емоцій представлена у вигляді графічної нотації. Описано принципи роботи алгоритму Віоли-Джонса, який використовується для визначення особи людини на зображенні Представлені підходи, які застосовуються для вирішення задачі класифікації: алгоритм Віоли-Джонса, метод опорних точок, різні архітектури нейронних мереж, які призначені для класифікації зображень. Проаналізовано переваги та недоліки методу опорних точок, що базується на системі кодування лицьових рухів, а також спосіб застосування алгоритму Віоли-Джонса для класифікації емоцій. Розглянуто метод розпізнавання емоційного стану людини на основі візуальної інформації із застосуванням згорткових нейронних мереж. Описано принципи дії згорткових, субдискретизуючих і повнозв'язних шарів нейронної мережі. На основі аналізу опублікованих робіт наведені результати точності розпізнавання в різних умовах. Також представлені роботи, в яких для аналізу емоційного стану застосовується комбінація згорткових і рекурентних нейронних мереж, де крім візуальної інформації використовується додаткове джерело – аудіопотік, що дозволяє більш ефективно класифікувати емоції в відео. Представлені найбільш популярні навчальні вибірки даних для вирішення розглянутої задачі.

Ключові слова: розпізнавання емоцій, класифікація, метод опорних точок, згорткова нейронна мережа, рекурентна нейронна мережа, навчальна вибірка.

A. L. ULIANKO, Y. I. DOROFIEIEV

REVIEW OF AUTOMATIC RECOGNITION METHODS OF HUMAN EMOTIONAL STATE USING IMAGE

The problem of recognizing a person's emotional state from an image is considered. A review of the main ways of describing human emotions is given: the division into a finite number of classes and the use of vector format. Existing developments in the field of emotions recognition by image are presented, as well as a general algorithm for the operation of such systems is provided. The main steps in solving the problem of recognizing emotions are the search for a face in the image and the emotions classification. Information technology for the recognition of emotions is presented in the graphic notation. The principles of the Viola-Jones algorithm, which is used to determine the person's face in the image, are described. The approaches that are used to solve the classification problem are described: the Viola-Jones algorithm, reference points method, various neural network architectures that are

© А. Л. Ульянко, Ю. И. Дорофеев, 2020

used to classify images. The advantages and disadvantages of the reference point method based on the facial action coding system are analyzed, as well as the way the Viola-Jones algorithm is used to classify emotions. A method for recognizing a person's emotional state based on visual information using convolutional neural networks is considered. The principles of the action of convolutional, sub-sampling and fully connected layers of the neural network are described. Based on the analysis of published works, the results of recognition accuracy under various conditions are presented. Also presented works in which combination of convolutional and recurrent neural networks is used to analyze the emotional state, where in addition to visual information used an audio stream, which gives more efficient classification of emotions in a video stream. The most popular training data sets for solving the considered problem are presented.

Keywords: emotion recognition, classification, reference point method, convolutional neural network, recurrent neural network, training set.

Введение. Распознавание эмоций человека по изображению играет важную роль в человеко-машинном взаимодействии и привлекает все больше внимания в современных исследованиях [1].

Принято разделять человеческие эмоции на шесть основных категорий, которые выделил P. Ekman в работе [2]: гнев, отвращение, страх, счастье, грусть и удивление. Также часто добавляют седьмое состояние – нейтральность. Однако некоторые авторы убеждены в том, что указанные категории не позволяют описать весь спектр эмоций [3]. Альтернативным решением является описание эмоционального состояния человека вектором, который имеет 2 или 3 измерения [4]. Наиболее распространенными измерениями являются уровень возбуждения, валентность и доминирование эмоции. Например, уровень возбуждения показывает, насколько человек взволнован или апатичен, валентность – насколько позитивной является эмоция, а уровень доминирования – насколько она контролируема.

Существующие разработки. Решением задачи распознавания эмоций человека занимаются ведущие мировые компании, на сайтах которых представлены результаты разработок: как Vision AI (Google) [5], Rekognition (Amazon) [6], Face API (Microsoft) [7], Watson Tone Analyzer (IBM) [8]. Это свидетельствует о том, что на сегодняшний день сервисы для распознавания эмоций являются востребованными. Принцип их работы заключается в том, что в API на вход подается статическое изображение и в результате пользователь получает вектор, который описывает координаты лиц на изображении, а также отображаемые на них эмоции. Хотя вышеупомянутые системы имеют высокую точность распознавания, а также некоторые из них способны работать с видеопотоком, основным их недостатком является отсутствие возможности работать автономно. При этом скорость получения результата зависит от пропускной способностью сети Internet, что накладывает ограничения на некоторые сценарии использования.

Для решения задачи распознавания эмоционального состояния человека по изображению используется информационная технология, которая представлена в графической нотации IDEF0 на рис. 1. Она включает следующие этапы: 1) регистрация изображения (обычно посредством камеры); 2) первичная обработка изображения – преобразование к требуемому размеру и формату, а также удаление шумов, источниками которых могут быть конструктивные недостатки средств регистрации изображений, плохое освещение сцены, помехи в каналах передачи данных и др.; 3) поиск лица на изображении; 4) предварительная обработка (например, выделение ключевых точек), а также нормализация и стандартизация входных данных; 5) распознавание эмоций – на вход классификатора подаются подготовленные данные, на выходе пользователь получает результат работы системы – наиболее вероятная эмоция.

Поиск лиц на изображении. Для поиска лиц на изображении обычно используется быстрый и эффективный алгоритм Виолы-Джонса, который был предложен в 2001 году и стал прорывом в области компьютерного зрения. Алгоритм использует технологию скользящего окна: рамка, размер которой меньше, чем

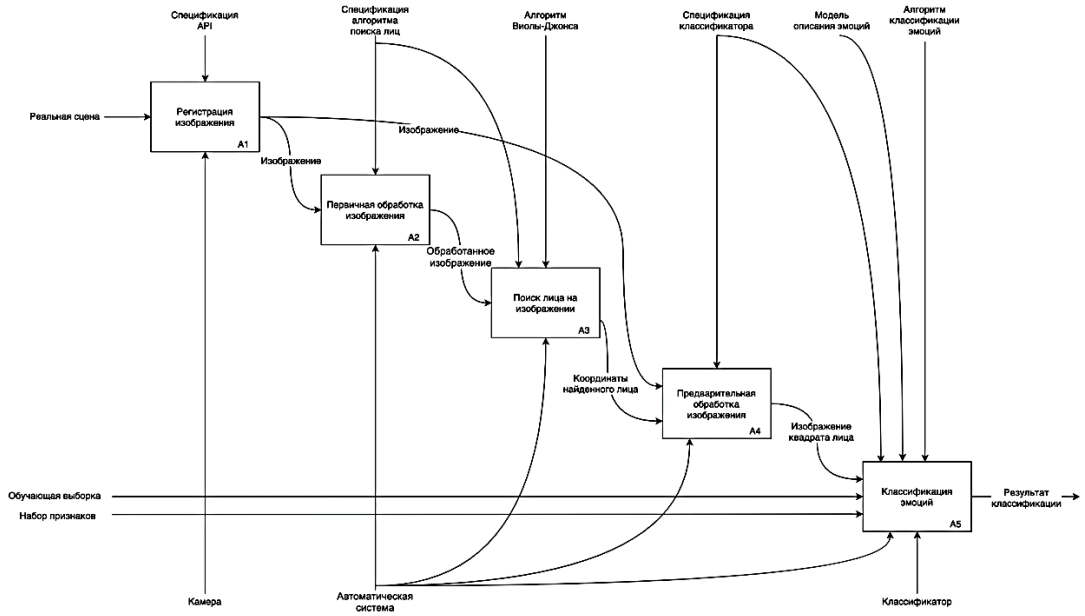


Рис. 1. Технология распознавания эмоций

исходное изображение, двигается с некоторым шагом по изображению, и с помощью каскада слабых классификаторов [9] определяется, есть ли в рассматриваемом окне лицо. Алгоритм состоит из 2-х этапов: обучения и распознавания. В алгоритме используются признаки Хаара, изображенные на рис. 2, которые впервые были предложены в работе [10].

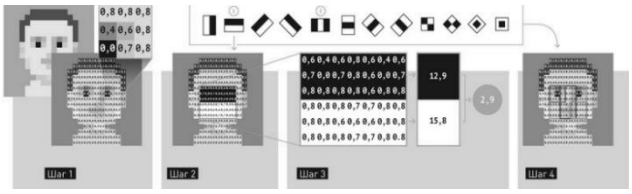


Рис. 2. Использование признаков Хаара

При помощи этих признаков определяются перепады светлых и темных участков на изображении. Так, например, по общим наблюдениям область глаз обычно темнее области щек. Поэтому общий признак Хаара для распознавания лиц представляет набор двух смежных прямоугольников, которые лежат выше глаз и на щеках.

Обобщенная схема алгоритма выглядит следующим образом: перед началом распознавания алгоритм обучения на основе тестовых изображений создает базу данных, состоящую из признаков. Далее алгоритм распознавания выполняет поиск объектов на изображении, используя созданную базу данных. Результатом работы алгоритма Виолы-Джонса является множество найденных на изображении объектов, соответствующих лицам людей. В настоящее время алгоритм активно применяется во многих системах.

Методы классификации эмоций. Существуют различные подходы к решению задачи автоматического распознавания эмоций. Одним из наиболее популярных является метод опорных точек [11], который базируется на поиске опорных точек лица, в частности 10 точек: по 2 точки для бровей, зрачков, углов рта, верхней и нижней губ. Далее при помощи системы кодирования лицевых движений (англ. FACS), представленных на рис. 3, рассчитываются координаты этих точек. После чего необходимо найти расстояние от ключевых точек и сравнить с базовыми значениями.

Так как размеры изображений могут быть разными, то за единицу измерения принимается расстояние между точками зрачков. После вычисления всех расстояний необходимо проанализировать те, которые влияют на проявление конкретной эмоции. К недостаткам данного подхода относят то, что он чувствителен к повороту лица, а также зависит от точности определения координат опорных точек.

Также для распознавания эмоций на изображении применяется вышеупомянутый алгоритм Виолы-Джонса. Однако из-за того, что для классификации эмоции необходимо использовать большое количество признаков, такой метод является более медленным по сравнению с другими алгоритмами. Использование данного алгоритма оправдано в системах, где скорость работы не очень важна.

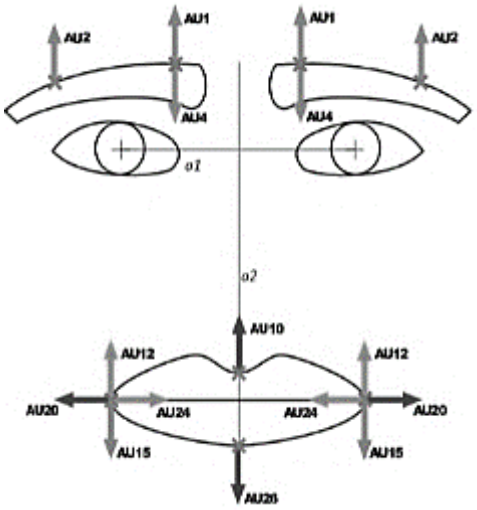


Рис. 3. Система кодирования лицевых движений (англ. FACS)

На данный момент наиболее востребованным инструментом в области распознавания изображений являются сверточные нейронные сети (СНС). Первой работой, благодаря которой началось современное распространение СНС, является публикация Яна Лекуна [12]. Однако всеобщее внимание СНС привлекли именно в 2012 году, когда под руководством Алекса Крижевски на основе СНС была разработана система, которая победила на конкурсе ImageNet (ежегодное соревнование по машинному зрению), снизив количество ошибок классификации с 26 % до 15 %.

СНС состоят из нескольких типов слоев: сверточные (англ. convolutional) слои, субдискретизирующие (англ. subsampling) слои и полносвязные слои. Задача сверточного слоя определить на изображении признаки путем наложения фильтров (рис 4), после чего применяется функция активации ReLU, которая позволяет удалить «фон» с изображения, то есть сформировать признаки.

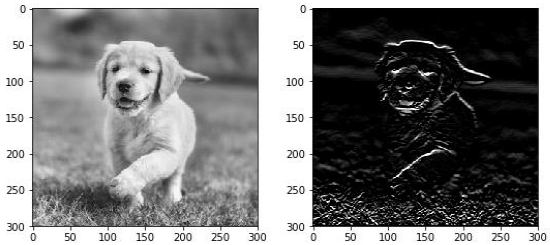


Рис. 4. Пример использования операции свертки

Принцип работы слоя субдискретизации описывается формулой

$$x^l = f(a^l * \text{subsample}(x^{l-1}) + b^l), \qquad (1)$$

где x^l – выход слоя l; $f()$ – функция активации; a^l,b^l – коэффициенты сдвига слоя l; subsample() – операция выборки локальных максимальных значений.

В последнем полносвязном слое используется функция активации, которая позволяет получить на выходе вектор, компоненты которого находятся в интервале [0, 1] и трактуются как вероятность отнесения эмоции к одному из классов. Именно такая архитектура позволяет наиболее эффективно решать задачу классификации изображений. Системы определения эмоций по выражению лица, использующие указанный подход, имеют точность распознавания в пределах 67-87% в зависимости от выбранной обучающей выборки.

Так, например, в 2017 году была предложена модель [8], основанная на сверточной нейронной сети, которая показала 96 % точность распознавания пола человека по изображению на выборке «IMDB gender dataset», а также 66 % точность при распознавании эмоций на выборке FER-2013.

В рамках конференции «AV+EC2015» была представлена работа [3], в которой решалась задача классификации эмоционального состояния человека в различных видеоклипах размером по несколько секунд. Было предложено несколько вариантов решения данной задачи, в том числе один из методов был основан на покадровом анализе видео с применением СНС архитектуры и классификацией эмоционального состояния в каждую единицу времени, а также решение, где сверточная сеть использовалась в комбинации с рекуррентной нейронной сетью (РНС). Кроме того, существует подход [13], когда при работе с видеопотоком используются не только данные, полученные из изображения, но и аудиопоток.

Обучающие выборки. Важную роль при настройке параметров СНС играют обучающие выборки данных. Наиболее часто в исследованиях упоминается датасет «FER-2013» [14], который был предложен на соревновании «Challenges in Representation Learning: Facial Expression Recognition Challenge» в 2013 году. Выборка содержит изображения размером 48×48 пикселей, которые делятся на 7 различных классов эмоционального состояния, из них 28709 относятся к обучающей выборке, 3589 – к тестовой. К качественным и популярным датасетам также можно отнести «Real-world Affective Faces Database» – 29762 изображения и «Acted Facial Expressions in the Wild», который состоит из промаркированных видеоклипов.

Заключение. В данной работе рассмотрены модели описания эмоционального состояния человека, представлены ведущие программные продукты в указанной области. Описан процесс распознавания эмоционального состояния человека по визуальным данным, а также методы, которые применяются для решения данной задачи. Вследствие бурного развития нейронных сетей в последние годы качество распознавания эмоций человека по изображению значительно возросло, а следовательно, увеличилась актуальность разработки подобных систем для коммерческих целей, среди которых значительное место занимают системы обеспечения безопасности людей с помощью автоматизированных охранных устройств видеонаблюдения, а также системы распознавания усталости и сонливости человека, которыми оснащаются современные автомобили.

Список литературы

1. Tao J., Tan. T., Picard R. W. Affective Computing and Intelligent Interaction. *First International Conference*. Berlin: Springer-Verlag, 2005. P. 981–995.
2. Ekman P. Universals and cultural differences in the judgments of facial expressions of emotion // *Journal of personality and social psychology*. 1987. Vol. 53, no. 4. P. 712–714.
3. Russell J., Mehrabian A. Evidence for a three-factor theory of emotions // *Journal of research in Personality*. 1977. Vol. 11, no. 3. P. 273–294.
4. Khorrami P., Le Paine T., Brady K., Dagli C., Huang T. S. How Deep Neural Networks Can Improve Emotion Recognition on Video Data. *2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Piscataway: IEEE, 2016. P. 619–623.
5. *Vision AI*. URL: https://cloud.google.com/vision (дата обращения 10.03.2020).
6. *Amazon Rekognition*. URL: https://aws.amazon.com/rekognition/ (дата обращения 11.03.2020).
7. *Face API*. URL: https://azure.microsoft.com/en-us/services/cognitive- services/face/ (дата обращения 09.03.2020).
8. *Watson Tone Analyzer*. URL: https://www.ibm.com/watson/services/tone-analyzer/ (дата обращения 10.03.2020).
9. Haar A. Zur Theorie der orthogonalen // Funktionensysteme. *Mathematische Annalen*. 1910. B. 69. S. 331–371.
10. Viola P. Robust Real-Time Face Detection // *International Journal of Computer Vision*. 2004, no. 57. P. 137–154.
11. Lanitis A., Taylor C. J., Ahmed T., Cootes T. F. Classifying variable objects using a flexible shape model. *Fifth International Conference on Image Processing and its Applications*. Edinburgh: IET, 1995. P. 70–74.
12. LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition // *Proceedings of the IEEE*. 1998. Vol. 86, no. 11. P. 2278–2324.
13. Kahou S, Bouthillier X., Lamblin P. EmoNets: Multimodal deep learning approaches for emotion recognition in video // *Journal on Multimodal User Interfaces*, 2015. No. 10. P. 99–111.
14. *Challenges in Representation Learning: Facial Expression Recognition Challenge*. URL: https://www.kaggle.com/c/challenges-in-representation-learning-facial-expression-recognition-challenge/data (дата обращения 12.03.2020).

References (transliterated)

1. Tao J., Tan. T., Picard R. W. Affective Computing and Intelligent Interaction. *First International Conference*. Berlin, Springer-Verlag Publ., 2005, pp. 981–995.
2. Ekman P. Universals and cultural differences in the judgments of facial expressions of emotion. *Journal of personality and social psychology*. 1987, vol. 53, no. 4, pp. 712–714.
3. Russell J., Mehrabian A. Evidence for a three-factor theory of emotions. *Journal of research in Personality*. 1977, vol. 11, no. 3, pp. 273–294.
4. Khorrami P., Le Paine T., Brady K., Dagli C., Huang T. S. How Deep Neural Networks Can Improve Emotion Recognition on Video Data. *2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Piscataway, IEEE Publ., 2016, pp. 619–623.
5. *Vision AI*. Available at: https://cloud.google.com/vision (accessed 10.03.2020).
6. *Amazon Rekognition*. Available at: https://aws.amazon.com/rekognition/ (accessed 11.03.2020).
7. *Face API*. Available at: https://azure.microsoft.com/en-us/services/cognitive-services/face/ (accessed 09.03.2020).
8. *Watson Tone Analyzer*. Available at: https://www.ibm.com/watson/services/tone-analyzer/ (accessed 10.03.2020).
9. Haar A. Zur Theorie der orthogonalen. Funktionensysteme. *Mathematische Annalen*. 1910, b. 69, s. 331–371.
10. Viola P., Jones M. Robust Real-Time Face Detection. *International Journal of Computer Vision*. 2004, no. 57, pp. 137–154.
11. Lanitis A., Taylor C. J., Ahmed T., Cootes T. F. Classifying variable objects using a flexible shape model. *Fifth International Conference on Image Processing and its Applications*, Edinburgh, IET Publ., 1995, pp. 70–74.

12. LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition *Proceedings of the IEEE*. 1998, vol. 86, no. 11, pp. 2278–2324.
13. Kahou S, Bouthillier X., Lamblin P. EmoNets: Multimodal deep learning approaches for emotion recognition in video. *Journal on Multimodal User Interfaces*. 2015, no. 10, pp. 99–111.
14. *Challenges in Representation Learning: Facial Expression Recognition Challenge*. Available at: https://www.kaggle.com/c/challenges-in-representation-learning-facial-expression-recognition-challenge/data (accessed 12.03.2020).

Поступила (received) 16.04.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ульянко Артем Леонідович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-3278-2687; e-mail: artem.ulyanko@gmail.com.

Дорофєєв Юрій Іванович (***Дорофеев Юрий Иванович***, ***Dorofieiev Yuri Ivanovych***) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-7964-1286; e-mail: dorofeev@kpi.kharkiv.edu.

Ульянко Артем Леонидович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий, г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0003-3278-2687; e-mail: artem.ulyanko@gmail.com.

Дорофеев Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0002-7964-1286; e-mail: dorofeev@kpi.kharkiv.edu.

Ulianko Artem Leonidovych – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", graduate student of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies; Kharkiv city, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3278-2687; e-mail: artem.ulyanko@gmail.com.

Dorofieiev Yuri Ivanovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies; Kharkiv city, Ukraine; ORCID: 0000-0002-7964-1286; e-mail: dorofeev@kpi.kharkiv.edu.

УДК 004.02 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.16**

Є. Л. БАТУРІН, В. Ю. ВОЛОВЩИКОВ, В. Ф. ШАПО

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДСИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОННИХ КЛЮЧІВ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБІГУ

В роботі розглянуто проблему ідентифікації документів в системах електронного документообігу. Актуальність даної теми обґрунтовано широким використанням систем електронного документообігу які потребують надійної ідентифікації документів, що передаються. Основними проблемами для ідентифікації документів в системах електронного документообігу є необхідність підтвердження авторства, незмінності документу та встановлення часу підпису. Наведено огляд основних методів ідентифікації, встановлено їх переваги та недоліки. Після аналізу можливих методів ідентифікації встановлено, що метод оснований на використанні електронних ключів дозволяє надійно встановити авторство документа, надає можливість встановити час підпису, забезпечує безвідмовність факту підпису та не потребує значних ресурсів для його формування та перевірки. Це принципово виділяє метод ідентифікації на основі електронних ключів серед інших. В основу метода покладено алгоритм цифрового підпису еліптичної кривої. Стійкість обраного алгоритму ґрунтується на проблемі дискретного логарифма в групі точок еліптичної кривої. Для реалізації алгоритму використовуються відкритий та закритий ключі. Після генерації пари ключів закритий ключ зберігається користувачем в таємниці та використовується для підпису документів, а відкритий використовується для ідентифікації користувача та має бути відомий всім користувачам системи. Розглянуто інформаційну підтримку підсистеми ідентифікації. Запропонована трирівнева архітектурна модель в якій роль клієнтського рівня виконує прикладний програмний інтерфейс. Обґрунтовано технології реалізації алгоритму підпису. Описані основні модулі, з яких має складатися підсистема та їх зв'язки. Розроблено програмне забезпечення підсистеми ідентифікації, яке дозволяє користувачам створювати як окремий так і вбудований в документ підпис а також виконувати його перевірку. Розроблена підсистема ідентифікації протестована з використанням файлів різних форматів та розмірів.

Ключові слова: підсистема ідентифікації, електронні ключі, документообіг, електронний підпис, алгоритм цифрового підпису еліптичної кривої, ідентифікація документа.

Е. Л. БАТУРИН, В. Ю. ВОЛОВЩИКОВ, В. Ф. ШАПО

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОДСИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ ЕЛЕКТРОННЫХ КЛЮЧЕЙ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА

В работе рассмотрена проблема идентификации документов в системах электронного документооборота. Актуальность данной темы обоснована широким использованием систем электронного документооборота требующих надежной идентификации передаваемых документов. Основными проблемами для идентификации документов в системах электронного документооборота являются необходимость подтверждения авторства, неизменности документа и определение времени подписи. Приведен обзор основных методов идентификации,

© Є. Л. Батурін, В. Ю. Воловщиков, В. Ф. Шапо, 2020

установлены их достоинства и недостатки. После анализа возможных методов идентификации установлено, что метод, основанный на использовании электронных ключей, позволяет надежно установить авторство документа, установить время подписи, обеспечивает безотказность факта подписи и не требует значительных ресурсов для её формирования и проверки. Это принципиально выделяет метод идентификации на основе электронных ключей среди других. В основу метода положен алгоритм цифровой подписи эллиптической кривой. Устойчивость избранного алгоритма основывается на проблеме дискретного логарифма в группе точек эллиптической кривой. Для реализации алгоритма используются открытый и закрытый ключи. После генерации пары ключей закрытый ключ хранится пользователем в тайне и используется для подписи документов, а открытый используется для идентификации пользователя и должен быть известен всем пользователям системы. Рассмотрена информационная поддержка подсистемы идентификации. Предложена трехуровневая архитектурная модель, в которой роль клиентского уровня выполняет прикладной программный интерфейс. Обоснованы технологии реализации алгоритмов подписи. Описаны основные модули, из которых должна состоять подсистема и их связи. Разработано программное обеспечение подсистемы идентификации, которое позволяет пользователям создавать как отдельную, так и встроенную в документ подпись, а также выполнять её проверку. Разработанная подсистема идентификации протестирована с использованием файлов различных форматов и размеров.

Ключевые слова: подсистема идентификации, электронные ключи, документооборот, электронная подпись, алгоритм цифровой подписи эллиптической кривой, идентификация документа.

Y. L. BATURIN, V. Y. VOLOVSHCHYKOV, V. F. SHAPO

INFORMATION TECHNOLOGY OF THE IDENTIFICATION SUBSYSTEM BASED ON ELECTRONIC KEYS IN ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEMS

The paper considers the problem of documents identification in electronic document management systems. The relevance of this topic is justified by the widespread use of electronic document management systems which require reliable identification of transferred documents. The main problems for identifying documents in electronic document management systems are authorship confirmation, confirmation of the document immutability and determining the signing time. A review of the main methods of identification is given, their advantages and disadvantages are identified. After possible identification methods analyzing, it was found that the method based on the electronic keys allows to reliably identify the document, determine the signing time, guaranty the fact of signing and does not require significant amount of resources for sign formation and verification. This distinguishes the method of identification based on electronic keys fundamentally among others. The method is based on the elliptic curve digital signature algorithm. The reliability of the chosen algorithm is based on the problem of the discrete logarithm in the group of points of the elliptic curve. To implement the algorithm public and private keys are used. After generating a key pair, the private key is kept in secret by the user and used to sign documents, the public key is used to identify the user and should be known to all users of the system. The information support of the identification subsystem is provided. A three-level architectural model in which the client level role is performed by the application programming interface is proposed. The technologies for implementing signature algorithms are considered. Identification subsystem software has been developed. This software allows users to create both individual and built-in document signatures, as well as to verify it. The developed identification subsystem was tested using files of different formats and sizes.

Keywords: identification subsystem, electronic keys, document flow, electronic signature, elliptic curve digital signature algorithm, document identification.

Вступ. Наявні способи передачі та обробки інформації обумовили появу загроз, пов’язаних з втратою, зміною або розкриттям даних. Це призвело до розвитку напряму інформаційної безпеки комп'ютерних систем і мереж. Під інформаційною безпекою розуміють захищеність інформації від несанкціонованого ознайомлення, зміни та знищення, а також захищеність інформаційних ресурсів від дій, спрямованих на порушення їх працездатності [1]. Інформаційна безпека комп'ютерних систем досягається гарантією конфіденційності, цілісності та достовірності даних, що обробляються, а також доступності та цілісності інформаційних компонентів і ресурсів системи.

Для контролю доступу до інформації та ресурсів системи, а також забезпечення цілісності та достовірності даних використовуються підсистеми ідентифікації та аутентифікації [1–3]. Це робить розробку підсистем ідентифікації та аутентифікації актуальним та важливим напрямом.

Проблема ідентифікації учасників електронної взаємодії. Те, що наразі питання розробки підсистем ідентифікації та аутентифікації є актуальними доводить все більша увага науковців в галузі інформаційної безпеки. Способи ідентифікації та аутентифікації учасників електронної взаємодії всебічно розглядаються та класифікуються в багатьох публікаціях. Насамперед слід відмітити, що на основі аналізу [1, 3] можна стверджувати, що поняття ідентифікації та аутентифікації є взаємопов’язаними та виконують функцію перевірки справжності суб’єктів. Тож має сенс розглядати їх як єдине поняття ідентифікації. Слід зауважити, що підсистеми ідентифікації можуть бути класифіковані за різними ознаками. Так, наприклад, в роботах [1, 4, 5] автори категоризують підсистеми ідентифікації за типом наданих суб’єктом сутностей.

1. Ідентифікуючі користувача за тим, що він знає. До таких підсистем автори відносять парольні підсистеми та ті, що засновані на PIN-кодах.

2. Ідентифікуючі користувача за тим, що він має. Прикладом є смарт-картки, електронні ключі, магнітні картки.

3. Ідентифікуючі користувача за тим, хто він є. Такі підсистеми засновані на фізіологічних та поведінкових атрибутах живого організму.

Зі свого боку роботи [1, 6] надають наступну класифікацію підсистем ідентифікації за різновидами використаних ідентифікаційних ознак.

1. Електронні. В таких підсистемах ознаки ідентифікації зберігаються в пам’яті у вигляді цифрового коду ідентифікатора.

2. Біометричні. Такі підсистеми для роботи використовують унікальні особливості людини в якості ідетифікаторів. В роботах виділяються статична та динамічна біометрії. Статична біометрія заснована на вимірюванні фізіологічних особливостей людини в той час як динамічна біометрія заснована на аналізі дій та поведінки людини.

3. Комбіновані. Згідно з аналізом джерел такі системи використовують одночасно декілька ознак для ідентифікації.

Таким чином, можна стверджувати, в тому числі спираючись на аналіз [1, 3–6], що проблема ідентифі-

кації наразі активно розглядається багатьма як вітчизняними, так і іноземними авторами, та потребує вирішення.

Аналіз існуючих методів. Одним з методів надійної ідентифікації є парольна ідентифікація. В роботах [1–3] детально розглядаються парольні підсистеми ідентифікації. Ці підсистеми можуть базуватися на одноразових та багаторазових [1, 2] паролях. Процедура ідентифікації користувача за допомогою багаторазового пароля може бути описана наступним чином. Користувач надає системі свої ідентифікатор і пароль. Вони надходять для обробки на сервер ідентифікації. У базі даних, що зберігається на сервері ідентифікації, за ідентифікатором користувача знаходиться відповідний запис, з нього витягується хеш пароля і порівнюється з хешем наданого пароля. Якщо вони співпали, то ідентифікація пройшла успішно, користувач отримує права і ресурси мережі, які визначені для його статусу. Одноразові паролі найчастіше можуть бути використані в системах двофакторної ідентифікації. В такому разі користувачеві або пристрою необхідно пред'явити одноразовий пароль, згенерований центром розподілу паролей. Для забезпечення надійного захисту пароль повинен бути відомий лише користувачеві та нікому іншому. Автори відмічають такі переваги метода як простота використання та легкість інтеграції. Всі наведені роботи зазначають низьку надійність методу. Одним з найсуттєвіших недоліків є залежність надійності методу від користувачів [3].

Джерела [7–10] описують статичні біометричні підсистеми ідентифікації за голосом, обличчям та відбитками пальців. Технологія сканування обличчя підходить для тих випадків, де інші біометричні технології непридатні [7, 8]. Для ідентифікації особистості система використовує особливості очей, носа та губ. Процес аналізу ідентифікаторів зазвичай є ресурсномістким та виконується за допомогою систем штучного інтелекту. Основна перевага такого методу полягає в тому, що ідентифікація може проходити без прямої участі людини в її процесі. Такі системи широко використовуються в місцях великого скупчення людей. Однак вони не позбавлені недоліків. Наприклад, висуваються суворі вимоги до апаратів, що створюють зображення а також до самого зображення. До того ж на якість ідентифікації суттєво впливає освітленість.

Іншим прикладом біометричної системи ідентифікації є ідентифікація користувача за голосом, яка спирається на висоту, модуляцію та частоту звуку [9]. Технології розпізнавання за голосом мають деякі обмеження: голос людини можна легко записати, він змінюється залежно від самопочуття, емоційного стану та віку людини. Це обмежує використання даного метода здебільшого системами телефонії [1].

Метод встановлення особи за відбитком пальця, також відомий як дактилоскопія, є найбільш поширеним методом статичної біометричної ідентифікації [10]. Суть методу полягає в наступному: користувач прикладає палець до спеціального сканера, потім отримані дані про відбиток пальця перетворюються в цифровий код і порівнюються з кодами, наявними в базі даних системи ідентифікації. Застосування методу засноване на факті унікальності малюнка папілярних візерунків. Однією з основних причин широкого розповсюдження цього методу є наявність великих банків даних відбитків пальців. У загальному випадку підсистема ідентифікації на основі розпізнавання відбитків пальців замінює парольну підсистему ідентифікації.

В роботах [11, 12] розглядається питання динамічної біометричної ідентифікації. Одним з варіантів підсистеми ідентифікації на основі динамічної біометрії є підсистема ідентифікації на основі аналізу поведінки користувача в мережі [11]. Шляхом аналізу мережевого трафіку виявляються особливості кожного користувача, які виступають в якості ідентифікаторів. Аналізу піддаються як використані доменні імена, так і динаміка їх використання. Аналізується кількість запитів та їх інтенсивність а також використані інтернет додатки. Даний метод дуже вразливий до атак. Загалом надійність метода обумовлена збереженням в секреті алгоритмів аналізу. На практиці даний метод використовується лише як додатковий засіб захисту в комбінованих підсистемах ідентифікації.

Ще одним засобом динамічної біометричної ідентифікації користувача є аналіз клавіатурного почерку [12]. Клавіатурний почерк характеризують швидкість та динаміка введення а також частота виникнення помилок та використання клавіш. Автор розрізнює спосіб ідентифікації за введенням відомої та невідомої фрази. Обидва способи включають в себе режим навчання та режим ідентифікації. В режимі навчання система формує еталонні зразки з якими надалі буде зіставляти отримані дані. В режимі ідентифікації система з заданою періодичністю отримує інформацію про клавіатурний почерк користувача та, зіставляючи його з еталоном, робить висновок про надання доступу до ресурсів. Метод може працювати в фоновому режимі, тим самим забезпечуючи ідентифікацію користувача впродовж всієї робочої сесії. Недоліком методу аналізу клавіатурного почерку є обмеження областей використання підсистеми та низька надійність.

Деякі роботи [1, 13] висвітлюють проблему використання підсистем суворої ідентифікації. Так, автори одночасно вказують на те, що процедури суворої ідентифікації поділяються на односторонню, двосторонню та тристоронню ідентифікацію. Одностороння ідентифікація передбачає обмін інформацією лише в одному напрямі. Даний тип ідентифікації дозволяє виконати низку операцій.

1. Підтвердити справжність тільки однієї сторони інформаційного обміну.

2. Виявити порушення цілісності інформації, що передається.

3. Гарантувати, що переданими даними може скористатися лише сторона, що перевіряє.

Двостороння ідентифікація до того ж містить додаткову відповідь стороні, що перевіряє, яка повинна довести, що зв'язок встановлено з потрібним користувачем.

Тристороння сувора ідентифікація містить додаткову передачу даних від сторони, що доказує до

сторони, що перевіряє. Це дозволяє відмовитися від використання міток часу.

Також в проаналізованих роботах мова йде про те, що підсистеми суворої ідентифікації, в залежності від алгоритму, що використовується, поділяються на декілька груп.

1. Засновані на симетричних алгоритмах шифрування.
2. Засновані на алгоритмах електронного цифрового підпису.
3. Засновані на використанні криптографічного контрольного значення.
4. Засновані на нульових знаннях.
5. Засновані на сертифікатах з використанням перетворень в групах точок еліптичної кривої.

В більшості випадків сувора ідентифікації засновується на механізмі електронних ключів. Користувач має можливість визначити, чи володіє його партнер по зв'язку належним секретним ключем і чи може він використовувати цей ключ для підтвердження того, що він дійсно є справжнім партнером по інформаційному обміну.

Проаналізувавши матеріал, можна відмітити високу надійність, можливість гарантувати захист даних від стороннього втручання а також можливість підтвердження авторства переданих даних як відмінну рису підсистем суворої ідентифікації. Специфікою використання даного типу підсистем є області, де потрібно ідентифікувати автора даних, що передаються, а також впевнитися в цілісності цих даних та забезпечити неможливість відмови від факту передачі даних.

Постановка задачі. Аналіз робіт [1–13] показав, що наразі широко вивчаються різні підсистеми ідентифікації та підходи до їх реалізації. Також аналіз показав наявність областей, що потребують вирішення проблеми ідентифікації. Виходячи з цього, процес розробки підсистеми ідентифікації є актуальним.

На основі аналізу [14, 15] можна стверджувати, що проблема ідентифікації в системах електронного документообігу на даний час є актуальною. Також в роботах описані основні вимоги до підсистем ідентифікації, які мають бути задоволені для забезпечення всіх потреб інформаційної безпеки систем електронного документообігу. До таких вимог відносять надійність ідентифікації, можливість встановити авторство даних, та гарантувати неможливість відмови відправника від факту передачі даних. Для вирішення задачі ідентифікації в роботі пропонується використання підсистеми ідентифікації на основі електронних ключів. На основі аналізу існуючих методів ідентифікації можна стверджувати, що тільки ця підсистема в повній мірі задовольняє вимогам до підсистем ідентифікації обраної предметної області.

Таким чином, метою роботи є побудова інформаційної технології підсистеми ідентифікації на основі електронних ключів.

Концептуальна модель підсистеми ідентифікації на основі електронних ключів. Підсистема ідентифікації повинна забезпечувати можливість ідентифікації електронних документів будь-яких форматів за допомогою електронного цифрового підпису. В роботі розглядаються питання формування та перевірки електронного цифрового підпису з використанням електронних ключів. Пара приватного та публічного ключів генерується окремо для кожного з користувачів підсистеми. Приватний ключ повинен триматися в таємниці та зберігатися в локальному сховищі електронних ключів для подальшого його використання при підписанні електронних документів. Зі свого боку відкритий ключ має зберігатися в базі даних підсистеми ідентифікації та бути доступним всім користувачам підсистеми при використанні для перевірки дійсності підпису. Тоді процес підпису документа користувачем полягатиме в завантаженні документа та приватного ключа до підсистеми ідентифікації та вибору варіанту підписання. Автори вважають, що при цьому актуальним є один з двох сценаріїв генерації підпису.

1. Генерація підпису окремо від документа.
2. Генерація підпису вбудованого в документ.

Зворотній процес, який полягає в перевірці підпису, повинен також бути реалізований в межах підсистеми ідентифікації. В цьому випадку користувач має завантажити в підсистему підписаний документ або підпис та документ окремо.

Таким чином, цілісна підсистема ідентифікації повинна являти собою сукупність пов’язаних між собою програмних модулів. Модуль управління обліковими записами користувачів має надавати системі вищого рівня можливість зберігати та обробляти інформацію про користувачів підсистеми. Для надання функціоналу генерації пар публічних і приватних електронних ключів в підсистемі має бути реалізований модуль генерації електронних ключів. Модуль формування електронного цифрового підпису повинен надавати функціональність, що дозволятиме, отримавши в якості вихідних даних документ та приватний ключ, зберегти підписаний документ або підпис окремо від документа. Для отримання інформації щодо дійсності наданого підписаного документа або підпису окремо від документа підсистема повинна мати модуль перевірки електронного цифрового підпису.

Один з варіантів використання підсистеми ідентифікації – це генерація та зберігання користувачем приватного ключа та електронного цифрового підпису на автоматизованому робочому місці (АРМ) за допомогою надсилання відповідних запитів до підсистеми ідентифікації з web-браузера. В подальшому виконується передача підписаного документу транспортним каналом іншому користувачу, який за допомогою web-браузера надсилає запит на перевірку підпису. Концептуальна модель підсистеми ідентифікації зображена на рис. 1.

Технологія формування електронного цифрового підпису. Для формування електронного цифрового підпису в статті пропонується використання алгоритму Elliptic Curve Digital Signature Algorithm [1]. На першому етапі формування електронного цифрового підпису для документа M обчислюється його хеш-код

$$\bar{h} = h(M),$$

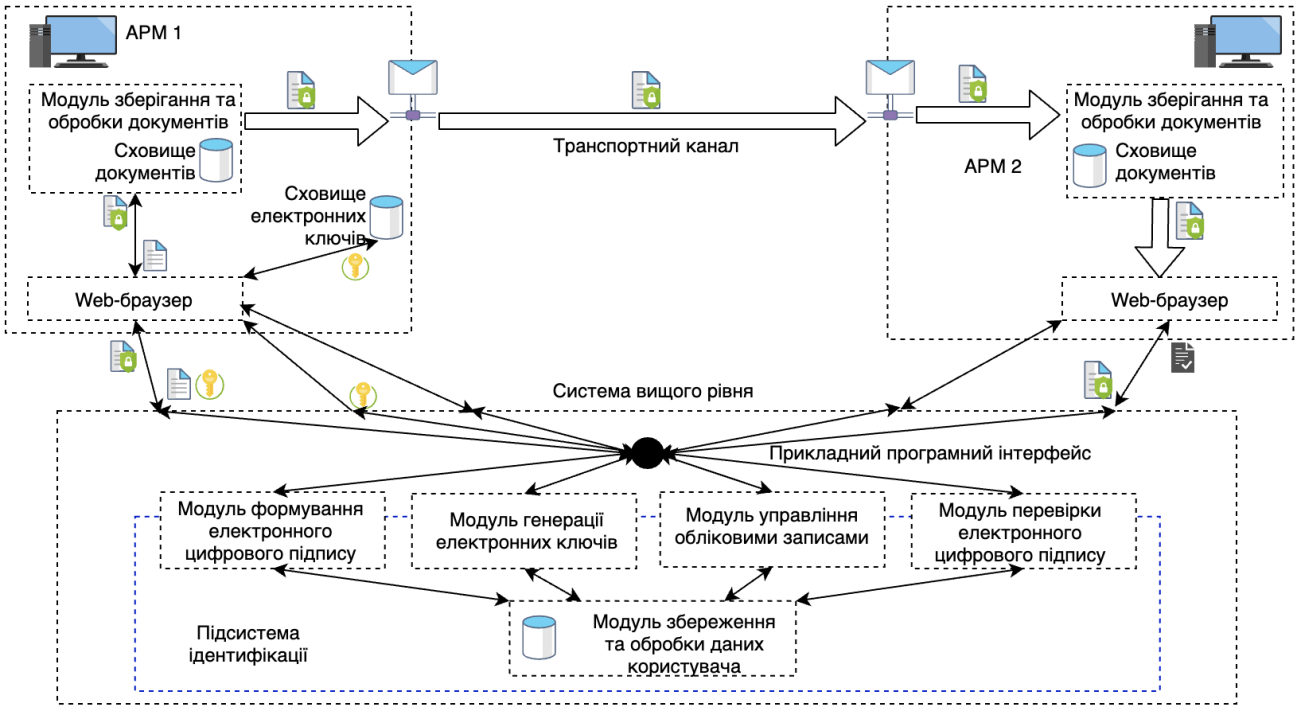


Рис. 1. Концептуальна модель підсистеми ідентифікації

а також ціле число α, двійковим представленням якого є вектор $\bar{h}$, та обчислюється

$$e = \alpha(\mathrm{mod}\ q),$$

де q – велике просте число що представляє порядок підгрупи групи точок еліптичної кривої для якого виконуються наступні умови:

$$\begin{cases} m = nq, n \in Z, n \geq 1, \\ 2^{254} < q < 2^{256}, \end{cases}$$

де m – ціле число, порядок групи точок еліптичної кривої.

Якщо $e = 0$, то визначається $e = 1$.

Другий етап починається з генерації випадкового (псевдовипадкового) цілого числа k, такого, що задовільнить нерівності

$$0 < k < q.$$

Також обчислюється точка еліптичної кривої:

$$C = kP,$$

де $P \neq 0$ – точка еліптичної кривої з координатами (x_p, y_p), що задовольняє рівності $qP = 0$.

Сутність третього етапу полягає в обчисленні

$$r = x_r(\mathrm{mod}\ q),$$

де x_r – x координата точки C.

Якщо $r = 0$, то слід повернутися до другого етапу алгоритму.

На четвертому етапі визначається значення

$$s = (rd + ke)(\mathrm{mod}\ q),$$

де d – ціле число, задовольняє нерівності $0 < d < q$.

Якщо $s = 0$ то алгоритм повторюється з другого етапу.

П'ятий етап починається з обчислення двійкових векторів $\bar{r}$ та $\bar{s}$ що відповідають r та s, визначається цифровий підпис як конкатенація двох двійкових векторів

$$\varpi = (\bar{r}||\bar{s}).$$

Для перевірки електронного цифрового підпису $(\bar{r}||\bar{s})$ на першому етапі з отриманого підпису обчислюються цілі числа r та s. Якщо виконуються нерівності:

$$0 < r < q,$$

$$0 < s < q,$$

то обчислення продовжується, інакше – підпис вважається невірним.

Другий етап починається з обчислення хеш-коду отриманого документа M

$$\bar{h} = h(M),$$

також обчислюється ціле число α, двійковим представленням якого є вектор $\bar{h}$, визначається

$$e = \alpha(\mathrm{mod}\ q).$$

Якщо e $= 0$, визначається $e = 1$.

На третьому етапі обчислюються значення:

$$z_1 = s^{-1}\bar{h}(\mathrm{mod}\ q),$$

$$z_2 = -s^{-1}r(\mathrm{mod}\ q).$$

На останньому етапі обчислюється точка еліптичної кривої

$$C = z_1P + z_2Q,$$

та визначається:

$$R = x_r(\mathrm{mod}\ q),$$

де x_c – координати точки C. Якщо рівність $R = r$ виконано, то підпис вважається дійсним, інакше – підпис невірний.

Інформаційна підтримка підсистеми ідентифікації на основі електронних ключів. Для реалізації описаного функціоналу авторами пропонується трирівнева архітектурна модель [16], в якій роль клієнтського рівня виконується прикладним програмним інтерфейсом, а основна частина задач по обробці інформації в підсистемі покладається на сервер застосунку. Запити від системи вищого рівня через прикладний програмний інтерфейс передаються на логічний рівень архітектурної моделі – сервер застосунку підсистеми ідентифікації. В якості сервера застосунку пропонується використання apache tomcat [17] – промислового рішення з відкритим вихідним кодом. За допомогою ресурсів сервера застосунку обчислюються основні операції підсистеми а також здійснюватися доступ до рівня даних. На рівні даних пропонується використання реляційної системи керування базами даних MySql [18]. Загальна схема архітектури підсистеми ідентифікації зображена на рис. 2.

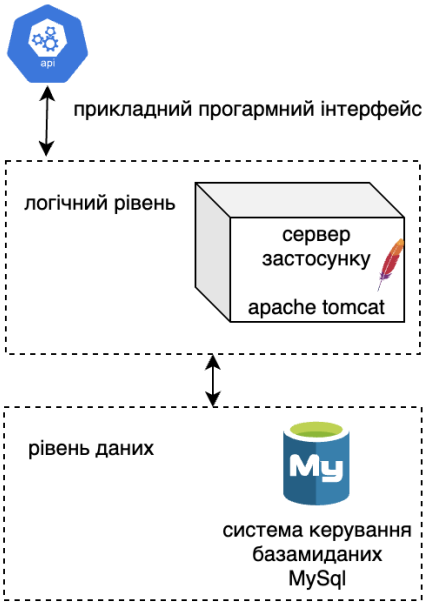


Рис. 2. Загальна схема архітектури підсистеми ідентифікації

З точки зору організації модулів програми мають бути відокремлені модулі, які використовують криптографічні функції для реалізації функціоналу, а саме: модуль формування електронного цифрового підпису, модуль перевірки електронного цифрового підпису та модуль генерації електронних ключів. Окремо слід виділити модуль відповідальний за обробку та збереження даних користувачів, який повинен мати доступ до бази даних. Клієнт повинен мати можливість взаємодіяти з рівнем даних лише через використання функціоналу логічного рівня. Діаграма компонентів підсистеми зображена на рис. 3.

Для імплементації підсистеми пропонується використання мови програмування Java [19]. В якості провайдера криптографічних функцій автори пропонують використання прикладного програмного інтерфейсу криптопровайдера з відкритим вихідним кодом Bounce Castle Crypto [20], який надає високорівневий інтерфейс для реалізації промислових стандартів Java Cryptography Extension [19] та Java Cryptography Architecture [19] з пакету Java Security [19] стандартної бібліотеки Java.

Результати досліджень. В результаті проведення дослідження отримано систему з прикладним інтерфейсом користувача, використовуючи який можна надсилати відповідні запити на генерацію ключів, підпис або перевірку підпису електронного документа.

В якості документа для підпису було використано файли різного розміру та формату. В таб. 1 наведено результати надсилання запитів з використанням документа формату rtf розміром 1 мегабайт. Табл. 2 демонструє результати однакових запитів на формування електронного цифрового підпису до системи з використанням документів різного формату та розміру.

Таблиця 1 – Результати запитів з використанням документу формату rtf розміром 1 мегабайт

Тип запиту	Час виконання	Результат
Запит на формування окремого від документа підпису	40–78 мілісекунд	Файл підпису розміром 793 байта
Запит на перевірку окремого від документа підпису	128–177 мілісекунд	Результат перевірки підпису в текстовому форматі
Запит на формування підпису вбудованого в документ	41–58 мілісекунд	Файл з вбудованим підписом розміром 1 мегабайт 793 байта.
Запит на перевірку підпису вбудованого в документ	117–143 мілісекунд	Результат перевірки підпису в текстовому форматі

Для зручності користувача передбачено інтерфейс для отримання статистичної інформації щодо документа, а саме: кількість підписань, кількість вдалих перевірок підпису, кількість невдалих перевірок підпису а також дату та час кожного підпису та інформацію щодо користувача-підписанта.

Висновки. В роботі розглянуто інформаційну технологію підсистеми ідентифікації на основі електронних ключів. В основу системи покладено трирівневу архітектурну модель в якій роль клієнта виконує прикладний програмний інтерфейс з використанням якого надається доступ до ресурсів підсистеми.

Таблиця 2 – Результати запиту на формування окремого підпису з використанням документів різного формату та розміру

Формат файла	Розмір файла	Час виконання
rtf	1 мегабайт	40–78 мілісекунд
mp4	446,3 мегабайта	10,28–11,43 секунд
pdf	228 кілобайт	28–34 мілісекунд

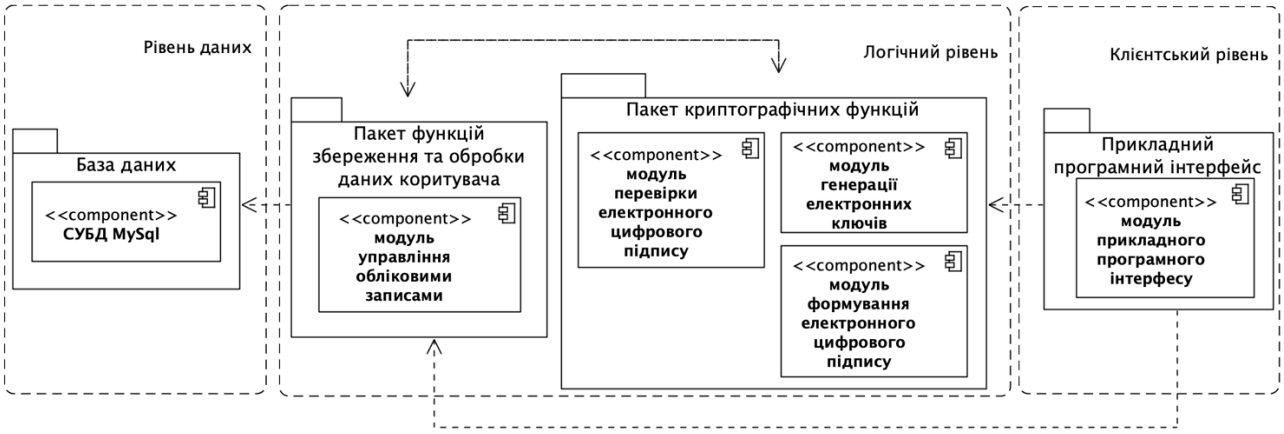


Рис. 3. Діаграма компонентів

Результатом дослідження є програмне забезпечення системи, яке виконує описані функції та відповідає висунутим вимогам. Розроблена підсистема надає функціональність для генерації пар електронних ключів а також підписання та перевірки підпису електронних документів будь-якого формату. Впровадження подібної підсистеми дозволить автоматизувати процес підпису документів що, зі свого боку, дасть можливість прискорити бізнес-процеси та підвищити надійність системи.

Список літератури

1. Шаньгин В. Ф. *Защита компьютерной информации. Эффективные методы и средства.* Москва: ДМК, 2010. 542 с.
2. Стельмашонок Е. В., Васильева И. Н. *Защита информации в компьютерных системах.* Санкт-Петербург: Из-во Санкт-Петербуржского нац. эконом. ун-та., 2017. 163 с.
3. Кошева Н. А., Мазніченко Н. І *Ідентифікація користувачів інформаційно-комп'ютерних систем: аналіз і прогнозування підходів.* Харків: нац. ун-т «Юридична академія імені Ярослава Мудрого», 2013. Т. 113, № 6. С. 215–223.
4. Messaoud Benantar *Access Control Systems Security, Identity Management and Trust Models.* TX: Sringer Publ., 2003. 261p.
5. Марков А. С., Цирлов В. Л. Безопаснось доступа: подготовка к CISSP *// Вопросы кибербезопасности.* 2015. № 2. С. 60–68.
6. Фадюшин А. М., Симонов В. Л. Современные системы идентификации личности. *Современные информационные технологи в образовании, науке и промышленности (02–03 ноября 2018 г., Москва)*. Москва: Спутник, 2018. С. 176–178.
7. Максименко В. Н., Волошина Т. С. Анализ системы распознавания лиц по алгоритму нейронной сети. *// экономика и качество систем связи.* 2015. № 4. С. 31–37.
8. Горлов В. Н. Алгоритмические средства идентификации человека по фотопортрету на основе геометрических преобразований. *Сборник статей IV международно-научной конференции (20 сентября 2018 г., Пенза).* Пенза: МЦНО «Наука и просвещение», 2018. С. 23–27.
9. Брюхомицкий Ю. А., Федоров В. М. Метод текстонезависимой идентификаци личности по голосу // *Известия ЮФУ*. 2015. С. 173–181.
10. Калуцкий И.В., Матюшин Ю.С., Спевакова С.В. Анализ современных статических методов биометрической идентификации // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2019. Т. 23, № 1. С. 84–94.
11. Лихачев А. Е., Павловский Е. Н., Хазанкин Г. Р. Разработка системы идентификации пользователей компьютерных сетей на основе анализа их поведения. // *Транспортное дело*. 2017. С. 171.
12. Перегудов А. В. Клавиатурный почерк как дополнительный способ идентификации пользователя. Международная научно-практическая конференция «Научные исследования и современное образование» *(26 марта 2018 г. Владивосток)* Владивосток. 2018. С. 240–241.
13. Олешко И. В., Горбенко И. Д. Сравнительный анализ протоколов строгой аутентификации // *Радиоотехника 2018.* № 171 С. 198–209.
14. Сабанов А. Г. Аутентификация при электронном обмене конфиденциальными документами // *Доклады ТУСУРа.* 2011. Т. 22, № 2. С.267–270.
15. Макарова И.И. Комплексная информационная безопасность электронного документооборота // *Управління проектами та розвиток виробництва: Зб.наук.пр.* – Луганськ: вид-во СНУ ім. В.Даля, 2004. Т. 11. № 3. С.100-105.
16. Л. Басс, П. Клементс, Р. *Кацман Архитектура программного обеспечения на практике*. Санкт-Петербург: Из-во Addison-Wesley, 2006. 306 с.
17. Офіційний сайт Apache Tomcat / *онлайн документація* / URL: http://tomcat.apache.org (дата звернення: 11.05.2020).
18. Офіційний сайт MySql / *онлайн документація* / URL: http://mysql.com (дата звернення: 11.05.2020).
19. Офіційний сайт Java / *онлайн документація* / URL: http://java.com (дата звернення: 11.05.2020).
20. Офіційний сайт bouncycastle / *онлайн документація* / URL: http://bouncycastle.org (дата звернення: 11.05.2020).

References (transliterated)

1. Shanhyn V. F. *Zashchita kompyuternoy informatsii. Effektivnyye metody i sredstva*. [Protection of computer information. Effective methods and tools]. Moscow: DMK., 2010. 542 p.
2. Stelmashonok E. V., Vasilieva I. N. *Zashchita informatsii v kompyuternykh sistemakh.* [Information security in computer systems]. St. Petersburg: Piter Publ., 2017. 163 p.
3. Kosheva N. A., Maznichenko N. I., *Identifikatsiia koristuvachiv informatsiino-komp'iuternikh sistem: analiz i prognozuvannia pidkhodiv.* [Identification of information systems and computer systems: analysis and forecasting]. Kharkiv: Yaroslav Mudryi National Law University Publ., 2013. № 6. pp. 215–223.
4. Messaoud Benantar *Access Control Systems Security, Identity Management and Trust Models.* TX: Sringer Publ., 2003. 261 p.
5. Markov A. S., Tsirlov V. L. Bezopasnos dostupa: podgotovka k CISSP [Security of access: preparation for CISSP] // *Cybersecurity issues*. 2015. № 2. pp. 60–68.
6. Fadiushin A. M., Simonov V. L. Sovremennye sistemy identifikatsii lichnosti. [Modern identity identification systems.] // Modern information technologies in education, science and industry (*November 2–03, 2018, Moscow*). Moscow: Sputnik Publ., 2018. pp. 176–178.
7. Maksimenko V. N., Voloshina T. S. Analiz sistemy raspoznavaniia lits po algoritmu neironnoi seti. [Analysis of the face recognition system by the neural network algorithm]. *// economics and quality of communication systems*. 2015. № 4. pp. 31–37.
8. Gorlov V. N. Algoritmicheskie sredstva identifikatsii cheloveka po fotoportretu na osnove geometricheskikh preobrazovanii. [Algorithmic means of human identification by photo portrait based

on geometric transformations]. Collection of articles of the IV international scientific conference *(September 20, 2018, Penza)*. Penza: «Science and education» Publ., 2018. pp. 23–27.
9. Briukhomitskii Iu. A., Fedorov V. M. Metod tekstonezavisimoi identifikatsi lichnosti po golosu. [Text independent identification method by voice]. // *News SFU*, 2015. pp. 173–181.
10. Kalutskii I.V., Matiushin Iu.S., Spevakova S.V. Analiz sovremennykh staticheskikh metodov biometricheskoi identifikatsii. [Analysis of modern static methods of biometric identification] // *News of Southwestern State University*. 2019. № 1. pp. 84–94.
11. Likhachev A. E., Pavlovskii E. N., Khazankin G. R. Razrabotka sistemy identifikatsii polzovatelei kompiuternykh setei na osnove analiza ikh povedeniia. [Development of a system for identifying users of computer networks based on an analysis of their behavior]. // *Transport business*. 2017. 171 p.
12. Peregudov A. V. Klaviaturnyi pocherk kak dopolnitelnyi sposob identifikatsii polzovatelia. [Keyboard handwriting as an additional way to identify a user]. International scientific-practical conference «Research and modern education» *(March 26, 2018 Vladivostok)* Vladivostok. 2018. pp. 240–241.
13. Oleshko I. V., Gorbenko I. D. Sravnitelnyi analiz protokolov strogoi autentifikatsii [Comparative analysis of strong authentication protocols]. // *Radio engineering* 2018. № 171 pp. 198–209.
14. Sabanov A. G. Autentifikatsiia pri elektronnom obmene konfidentsialnymi dokumentami. [Authentication in the electronic exchange of confidential documents]. *TUSUR reports*. 2011. № 2. pp. 267–270.
15. Makarova I.I. Kompleksnaia informatsionnaia bezopasnost elektronnogo dokumentooborota. [Comprehensive information security of electronic document management]. // *Project management and production development: A collection of scientific papers*. – Lugansk: Dahl Severodonetsk National Institute Publ., 2004. № 3. pp.100-105.
16. L. Bass, P. Klements, R. Katsman Arkhitektura programmnogo obespecheniia na praktike [Software architecture in practice] // St. Pitersburg: Addison-Wesley Publ. –2006. 306 p.
17. Apache Tomcat official site / *online documentation* / URL: http://tomcat.apache.org (date of application: 12.04.2020).
18. MySql official site / *online documentation* / URL: http://mysql.com (date of application: 12.04.2020).
19. Java official site / *online documentation* / URL: http://java.com (date of application: 12.04.2020).
20. Bouncycastle official site / *online documentation* / URL: http://bouncycastle.org (date of application: 12.04.2020).

Надійшла (received) 14.04.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Батурін Єгор Леонідович – бакалавр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0958-6215; email: baturin.egor@ukr.net

Воловщиков Валерій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4454-2314; e-mail: valera@kpi.kharkov.ua

Шапо Владлен Феліксович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Одеська морська академія», доцент кафедри теорії автоматичного управління і обчислювальної техніки; м. Одеса, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3921-4159; e-mail: stani@te.net.ua

Батурин Егор Леонидович – бакалавр, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0958-6215; email: baturin.egor@ukr.net

Воловщиков Валерий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедри программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4454-2314; e-mail: valera@kpi.kharkov.ua

Шапо Владлен Феликсович – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет «Одесская морская академия», доцент кафедри теории автоматического управления и вычислительной техники; г. Одесса, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3921-4159; e-mail: stani@te.net.ua

Baturin Yehor Leonidovich – bachelor, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, student; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0958-6215; email: baturin.egor@ukr.net

Volovshchykov Valeriy Yuriyovich – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4454-2314; e-mail: valera@kpi.kharkov.ua

Shapo Vladlen Felixovitch – Candidate of Technical Sciences, Docent, National University “Odessa Maritime Academy”, Associate Professor of the Theory of Automatic Control and Computing Machinery Department; Odessa, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3921-4159; e-mail: stani@te.net.ua

УДК 681.518:658.519 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.17**

V. Y. SOKOL, S. V. BRONIN, V. E. KARNAUKH, M. O. BILOVA

DEVELOPING ADAPTIVE LEARNING MANAGEMENT APPLICATION FOR PROJECT TEAM IN IT-INDUSTRY

Keeping employees aligned with modern trends and developments in their professional areas is the main focus of a lifelong learning approach. That becomes even more important for such dynamic industries like Information Technology. Therefore, it's crucial to extend existing e-learning management system with an adaptive training component that enables the effective study of on-demand skills, leading to a broader range of candidates available for project management to select from and consequently improving the overall performance of an IT company. To improve the existing learning process according to company's and employee's needs the overview of a typical learning management system functionality is given in this paper. The main benefits from the adoption of a learning management system in small and medium-sized IT-companies were discussed, analysis of their features and problems was given. The adjustment plan for the typical learning management system to be suitable for the information technology domain including module of the adaptive learning content selection using the basic principles of graph theory was proposed to reduce the time of the learning process. LMS OpenOLAT was reworked according to the adjustment plan which is reflected by the number of diagrams such as sequence diagram, IDEF0 business process description, activity diagram that shows search algorithm steps and application component diagram. Also, GUI was adjusted to provide user with a good look and feel. The benefits of the proposed approach in business processes of IT-company are shown using "Academy – Smart". To prove the efficiency of the proposed algorithm, real courses were used. Based on the learning material, provided by "Coursera", a number of test cases was formed and analyzed. After applying adaptive content selection algorithm according to the models of "Academy – Smart" employees, learning time was reduced and optimized. This investigation has shown significant improvement in the resource management process and acceleration of the learning process for employees.

Keywords: e-learning, adaptive learning, learning management system, content selection, graph theory, IT company.

В. Є. СОКОЛ, С. В. БРОНИН, В. Е. КАРНАУХ, М. О. БІЛОВА

РОЗРОБКА ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ АДАПТИВНИМ НАВЧАННЯМ ПРОЕКТНОЇ КОМАНДИ В ІТ-ІНДУСТРІЇ

Безперервна підтримка особистого розвитку співробітників відповідно до сучасних тенденцій їх професійної сфери є основним підходом до корпоративного навчання. Це стає ще важливішим для такої динамічної галузі, як інформаційні технології. Зважаючи на це, важливо розширити чинні системи управління електронним навчанням за допомогою адаптивного навчального компонента. Такий компонент дозволяє ефективно засвоювати необхідні навички, що веде до збільшення кількості потенційних кандидатів на участь у проекті та, як наслідок, підвищення загальної продуктивності ІТ-компанії. Для вдосконалення наявного навчального процесу відповідно до потреб компанії та працівника в цій статті наведено огляд типової функціональності систем управління навчанням. Розглянуто основні переваги впровадження системи управління навчанням у малих та середніх ІТ-компаніях, проаналізовано їх особливості та проблеми. Запропоновано шлях удосконалення типової системи управління навчанням, яка підходить для використання в області інформаційних технологій, включаючи модуль адаптивного вибору змісту навчального матеріалу з використанням основних принципів теорії графів для скорочення часу навчального процесу. Система OpenOLAT була доповнена відповідно до запропонованого плану, що показано на діаграмах, таких як діаграма послідовностей, опис бізнес-процесів IDEF0, діаграма діяльності, що показує кроки алгоритму пошуку та діаграма компонентів додатку. Крім того, було розроблено графічний інтерфейс користувача для забезпечення зручної взаємодії з додатком. Переваги запропонованого підходу в бізнес-процесах ІТ-компанії показані відповідно до роботи «Academy – Smart». Для доведення ефективності запропонованого алгоритму були використані реальні курси. На основі навчального матеріалу, наданого «Coursera», було сформовано та проаналізовано низку тестових прикладів. Після застосування алгоритму адаптивного вибору контенту за моделями працівників «Academy – Smart» час навчання скорочувався та оптимізувався. Це дослідження показало значне вдосконалення процесу управління ресурсами та прискорення процесу навчання працівників.

Ключові слова: e-learning, адаптивне навчання, система управління навчанням, вибір контенту, теорія графів, ІТ-компанія

В. Е. СОКОЛ, С. В. БРОНИН, В. Э. КАРНАУХ, М. А. БЕЛОВА

РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНЫМ ОБУЧЕНИЕМ ПРОЕКТНОЙ КОМАНДЫ В IT-ИНДУСТРИИ

Непрерывная поддержка личного развития сотрудников в соответствии с современными тенденциями их профессиональной сферы является основным подходом к корпоративному обучению. Это становится еще более важным для такой динамичной отрасли, как информационные технологии. Исходя из этого, важно расширить действующие системы управления электронным обучением с помощью адаптивного учебного компонента. Такой компонент позволяет эффективно усваивать необходимые навыки, ведет к увеличению количества потенциальных кандидатов на участие в проектах и, как следствие, повышение общей производительности IT-компании. Для совершенствования имеющегося учебного процесса в соответствии с потребностями компании и работника, в этой статье приведен обзор типичной функциональности систем управления обучением. Рассмотрены основные преимущества внедрения системы управления обучением в малых и средних IT-компаниях, проанализированы их особенности и проблемы. Предложен путь совершенствования типовой системы управления обучением, которая подходит для использования в области информационных технологий, включая модуль адаптивного выбора содержания учебного материала с использованием основных принципов теории графов для сокращения времени учебного процесса. Система OpenOLAT была дополнена в соответствии с предложенным планом, что показано на диаграммах, таких как диаграмма последовательностей, описание бизнес-процессов IDEF0, диаграмма деятельности, которая показывает шаги алгоритма поиска, и диаграмма компонентов приложения. Кроме того, был разработан графический интерфейс пользователя для обеспечения удобного взаимодействия с приложением. Преимущества предлагаемого подхода в бизнес-процессах IT-компании показаны с точки зрения работы «Academy – Smart». Для доказательства эффективности предложенного алгоритма были использованы реальные курсы. На основе учебного материала, предоставленного «Coursera», был сформирован и проанализирован ряд тестовых примеров. После применения алгоритма адаптивного выбора контента по моделям работников «Academy – Smart» время обучения сокращалось и оптимизировалось. Это исследование показало значительное усовершенствование процесса управления ресурсами и ускорения процесса обучения работников.

Ключевые слова: e-learning, адаптивное обучение, система управления обучением, выбор контента, теория графов, IT-компания.

© V. Y. Sokol, S. V. Bronin, V. E. Karnaukh, M. O. Bilova, 2020

Introduction. Despite the broad functionality, Learning Management Systems (LMS) have not yet reached the e-learning marketplace to provide lifelong professional development for the specific IT market that demands from developers a broad and extendable skill set. IT companies are forced to create their own LMS for managing talents and assigning appropriate employees on the upcoming projects. This approach is time-consuming and requires additional resources for the development and support effort.

Considering this fact, it is crucial to improve the existing, open-source software by automating and accelerating employee training for IT based on specific project requirements, rather than developing a new LMS from scratch. Talent management systems can be useful for accomplishing this task, helping recruiters and training professionals to develop and retain people with the necessary abilities or skills.

Combining these systems by making learning content adaptive and based on individual needs enables resource managers to shorten the time needed for preparing specialists, improve staff skills effectively and reduce the cost of training.

Taking into account integrated knowledge-based methodological framework for staff-training in IT-companies [1; 2], we identified necessity to construct a software component for adaptive learning content selection, integrate it into the existing architecture and define which communication channels between systems should be used. These changes and the component itself are needed for effective education of employees so they could fulfill their duties within the project at the highest level. This work is part of a research task 0119U002558 "Software development methods and tools for IT-companies personnel training using corporate knowledge".

Related Work. Unlike the regular education system, the goal of corporate learning is, first and foremost, to return on investment, namely using the knowledge acquired in the process of learning [3]. An employee at an IT company acts as the principal asset for the technological features of curriculum design and development not only to ensure effective learning, the stability of the acquired knowledge and skills, as well as the opportunity to participate in more complex and cost-effective projects.

E-learning can be defined as any development practice that is delivered via the Internet or other e-learning source of information [4]. It is an online learning system that involves the use of a computer, laptop, or any electronic device and can continuously acquire knowledge and skills through learning events that are formed, delivered, supported by web technologies. E-training is considered as part of e-earning, which is more practical in nature and involves the use of acquired knowledge in specific cases [5].

The benefits of e-learning in IT companies include the following:

1) the ability to study anytime, anywhere [5–7];

2) the sequence of training [6];

3) the availability of access to a comprehensive archive of course content and its timely updates on a continuous basis [5; 7].

4) save time and minimize job separation [8];

5) economy by reducing the cost of travel for employees [5; 6];

6) increasing productivity, improving training activities, return on investment [5; 8];

7) improvement of the skills and knowledge of employees [5; 9].

At the same time, let us point out the disadvantages of using e-learning, which include technical issues related to technology compatibility, poor internet connection, etc.; high cost of development and support; organizational problems [5].

Despite the drawbacks, e-learning has become an alternative form of acquisition of IT knowledge and practical skills through technological innovation and modern communication systems. Increasing use of this type of learning has an impact on the working environment due to the system's compliance with scalability, access and timeliness requirements [10].

Typical LMS functionality provides the following [11–13]: user registration; maintaining a course catalog; maintaining and providing access to the content and materials of e-learning courses; downloading e-learning modules and tools for staff; dissemination of educational material; management of educational materials; integration of knowledge management resources; checking and evaluating employees; tracking and recording employee outcomes and progress, etc.

However, the main feature in typical LMS is absent – adaptive learning. Adaptive learning, also known as adaptive teaching, is an educational method, which uses computer algorithms to orchestrate the interaction with the learner and deliver customized resources and learning activities to address the unique needs of each learner [1]. In professional learning contexts, it means that computers adapt the presentation of educational material according to employees' learning needs, as indicated by their responses to questions, tasks and experiences. The next chapter describes main technologies and methodologies used for implementing adaptive learning for LMS.

Models & Methods. Adaptive learning systems have traditionally been divided into separate components or "models". While different model groups have been presented, most systems include some or all of the following models (occasionally with different names) [14; 15].

1. Expert model – The model with the information which is to be taught.

2. Student model – The model which tracks and learns about the student (employee).

3. Instructional model – The model which actually conveys the information.

4. Instructional environment – The user interface for interacting with the system.

In the developed application «student model» is used where «student» is represented by the particular employee. The simplest means of determining an employee's skill level is the method employed in computerized adaptive testing (CAT) [16]. In CAT, the subject is presented with questions that are selected based on their level of difficulty in relation to the presumed skill level of the subject. As the

test proceeds, the computer adjusts the subject's score based on their answers, continuously fine-tuning the score by selecting questions from a narrower range of difficulty.

An algorithm for a CAT-style assessment is simple to implement. A large pool of questions is amassed and rated according to difficulty, through expert analysis, experimentation, or a combination of the two. The computer then performs a search, giving the subject a question which is between determined subject's maximum skill level and minimum required skill level. These levels are then adjusted to the level of the difficulty of the question, reassigning the minimum if the subject answered correctly, and the maximum if the subject answered incorrectly [16].

CAT successively selects questions for the purpose of maximizing the precision of the exam based on what is known about the examinee from previous questions. This perfectly firsts the issue to solve.

Besides, due to certain shortcomings of existing LMSs and certain prospects for their improvement, we propose to formulate an algorithm for testing an employee and for him to choose an adaptive program of learning in applying graph theory.

However, to implement this algorithm, it is vital to understand how to define competencies and how to map them onto employee's skill set.

Such frameworks as e-CF ("The European e-Competence Framework") and SFIA ("The Skills Framework for the Information Age") can be used for the developing of learning as the base proofed knowledge about IT competences and necessary skills.

The European Competence System (e-CF) provides an accessible and detailed description of competences accepted in the IT industry, using a unified definition for competences, skills, knowledge and levels of knowledge, providing a common understanding of them for European organizations [17].

Hence, The European Competence System was applied to select competences and relevant skills. Skills, mapped to competencies, can be represented through a graph. In mathematics, and more specifically in graph theory, a graph is a structure amounting to a set of objects in which some pairs of the objects are in some sense "related" [18]. The objects correspond to mathematical abstractions called vertices (also called nodes or points) and each of the related pairs of vertices is called an edge (also called link or line) and directed graph or digraph is a graph in which edges have orientations [19].

Proposed approach. Based on the basic principles of graph theory [18; 19], in this research we propose to represent the organization of knowledge and competencies of the staff with the help of an oriented tree. According to this, the root of the tree is a position that is likely to be given to an employee. The connecting vertices of the root are the so-called vertices of the first level, namely, the level of competence. In scope of this paper, the following approach is developed in order to implement the software for adaptive learning.

The structure of the organization of knowledge and competencies of the staff can be conveniently represented with the help of an oriented tree.

The root of the tree is a position that is likely to be given to an employee. The connecting vertices of the root are the so-called vertices of the first level, namely, the level of competence.

The leaves of the graph define the final knowledge that corresponds to certain skills. This is shown on the figure 1.

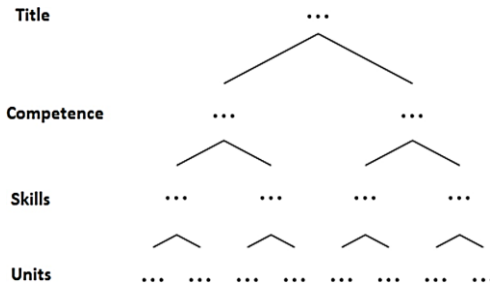


Fig. 1. Graph that represents relation of competence to skills

A label is added to the top of the graph model – the minimum knowledge threshold needed to create an individual refinement plan, as in figure 2.

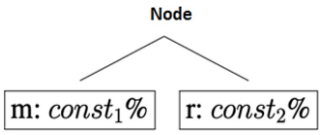


Fig. 2. Graph node structure

Property m means minimum knowledge threshold. Property r indicates the required level of knowledge to work on the project. The $const_1$ and $const_2$ variables are arbitrary numbers where $0\% \leq const_1 < const_2 \leq 100\%$.

Let us look at an example of using the suggested approach for comparing a qualification and a competency tree to a real-world IT company.

The concrete but simplified example is introduced for the Middle Java Developer competency. The specified competency has a lot of requirements according to the e-CF, but let us take only some of them into consideration in order to save the visibility of the example. Having a typical business-to-customer project, the list of desired skills is as follows: Code writing that includes the usage of Spring Framework (Core, Data), Groovy language for scripting. It is assumed that Java is a top skill of the candidate, so no need to include this information to the graph. Besides, the applicant should have sufficient knowledge in CI/CD process, in pipeline creation in particular.

It is a complex task to find the candidate that corresponds the required skills with 100% rate, so in makes sense to determine the preliminary level for each unit, that reflects knowledge, enough for learning(m) and level, that matches requirements (r).

The final graph for the specified skill's requirements is represented on the figure 3.

On the represented graph the difference in r and m values is not really high, that emphasize the urgency.

The next step is the search for applicable employees. Important, that employees are selected by the required level of knowledge (r) defined in the e-CF or project requirements.

Minimum knowledge threshold (m) should be defined separately depending on the urgency, because having higher 'm' value means less time for learning needed to obtain the certain competence.

The main result is the list of employees that are applicable for a particular competence (with or without learning). In order to select the most applicable employees per a competence for the future learning, the search algorithm is represented by the following diagram in figure 4.

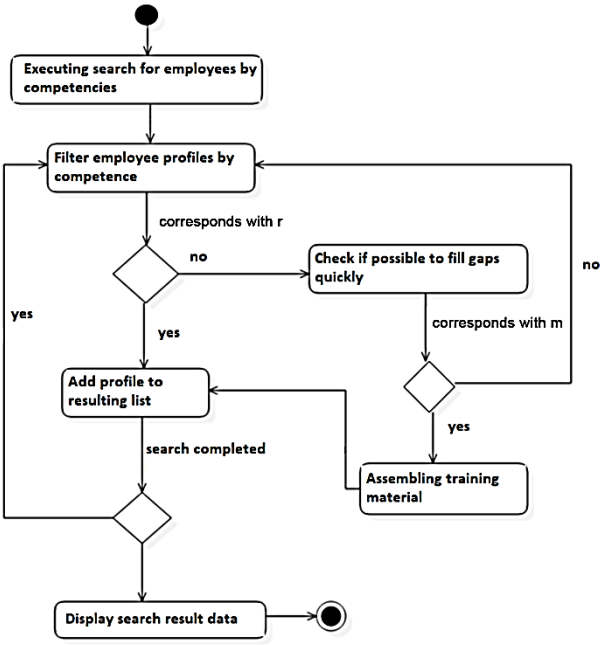


Fig. 4. Searching algorithm for employees by competence

To describe the business processes of the given approach, an information model was created in IDEF0, which is shown in the figure 5.

The time needed for learning process was chosen as the main metric for measuring effectiveness of suggested approach. Continuing the previous example, the employee will be assigned to the CI/CD course.

Usually, these courses are pretty long-lasting: the course about this topic on the Udemy lasts 5.5 hours. Time needed for gaining knowledge about Pipeline is about 1 hour [20]. Therefore, it takes 5 times less to be prepared according to project needs by choosing only one unit from the whole course. So, applying the suggested approach can reduce the time consuming without loses of knowledge for project needs.

Thus, the proposed algorithm helps to determine the level of employee's suitability for the project role and suggest the learning material according to the gaps in his skills reducing the learning time.

Practical implementation. To present practical implementation of proposed algorithm for the following customization, OpenOLAT LMS was chosen because of its clear modular structure and extendability. The selected application is developed using Spring Framework and all the modules have RESTful API. OpenOLAT Learning management is used as a service, so the communication between modules is implemented by the API approach that is used by view component. As can be observed from the diagram, there are also modules for content and user profile management, OpenOLAT LMS represented a corresponding API for them too. Main components of the developed application are shown on the diagram represented by figure 6.

As a result, the application for learning employees by required competencies in IT-companies, based on the given algorithm, was developed, including adaptive learning content and skill testing modules. This application can be used wherever the API for content and user profile modules exists.

On the following diagram, that is represented on the figure 7, there is a sequence diagram dedicated to the content selection for the employee.

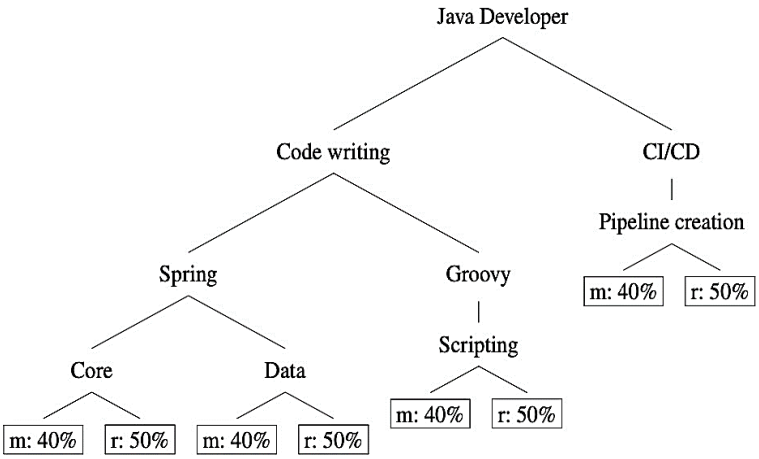


Fig. 3. Graph that represents skill set for Middle Java Developer

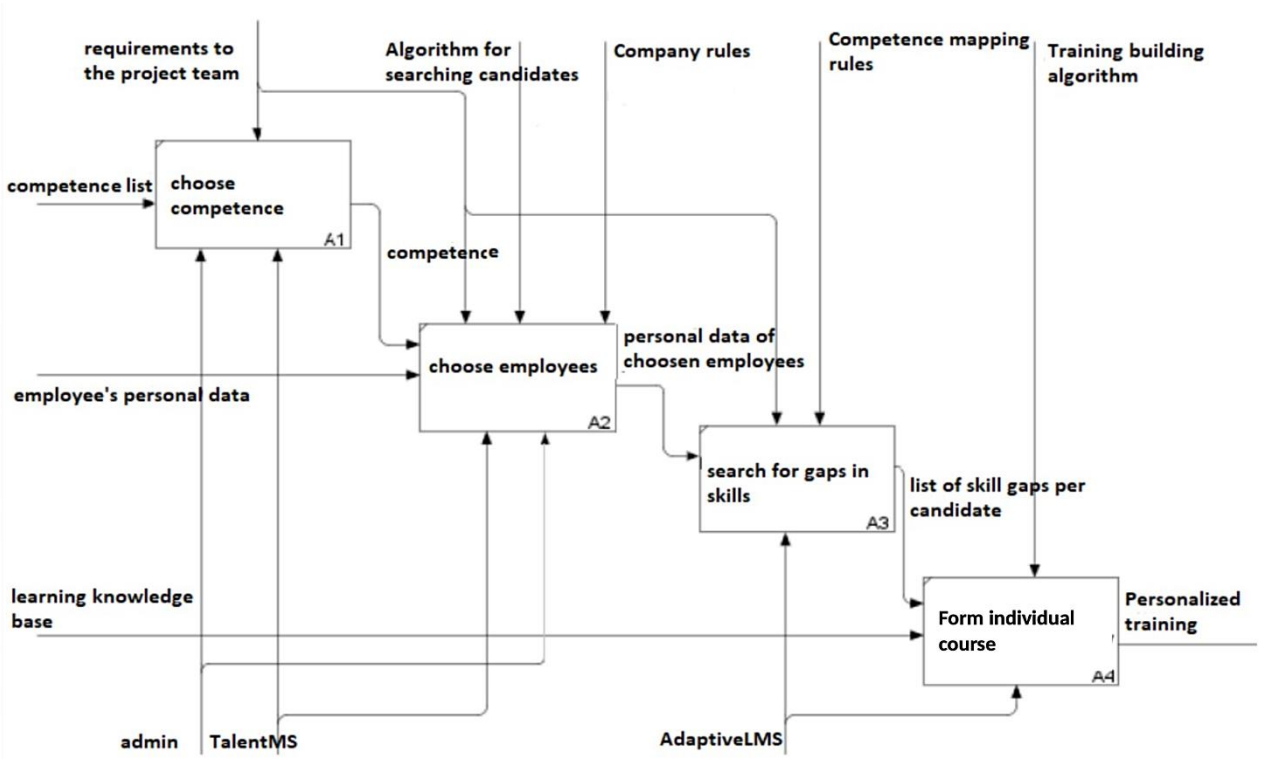


Fig. 5. Decomposed IDEF0 diagram for building personalized learning process

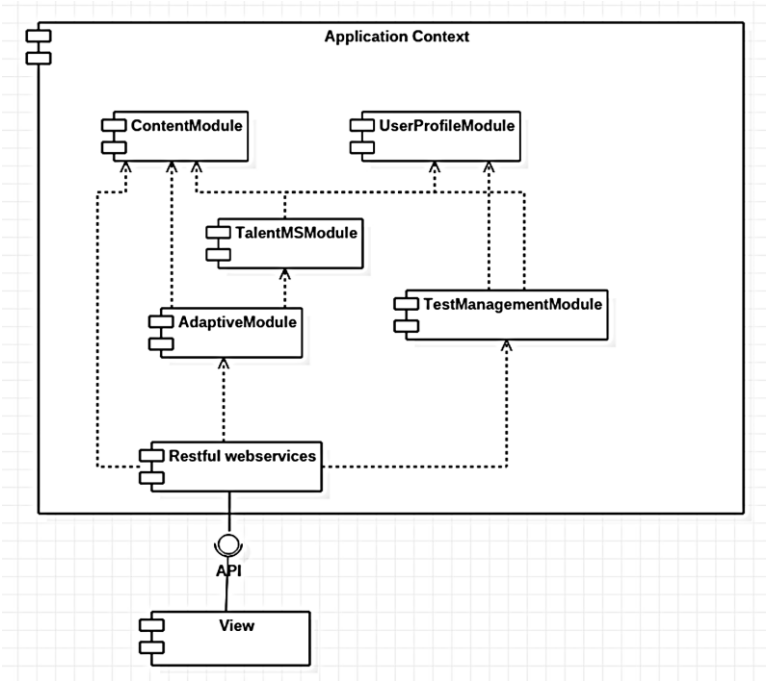


Fig. 6. Application component diagram

To obtain educational content, sequential processes are performed.

1. The employee initiates a request for learning material.

2. A method that is related to the semantics of a customer request is implemented. In the middle of the method, the controller delegates the execution of the AdaptiveContentFacade facade request.

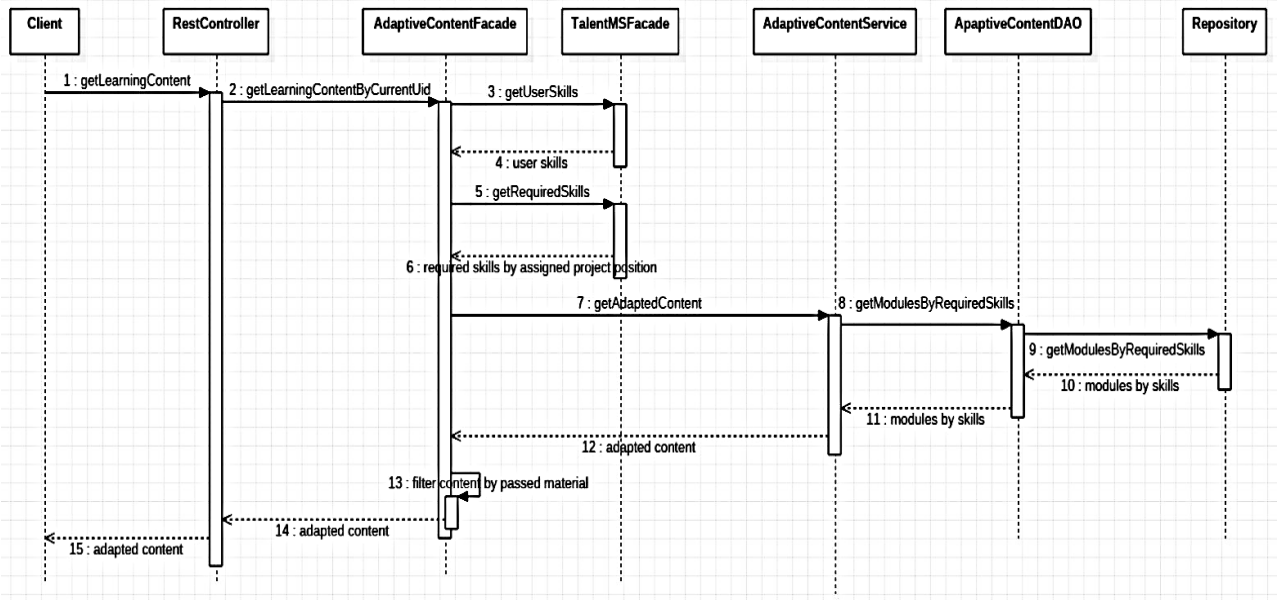


Fig. 7. Sequence diagram which reflects the choice of educational content for user

3. AdaptiveContentFacade refers to TalentMSFacade that uses OpenOLAT as user storage in order to retrieve the information about current user learning state and skills.

4. TalentMSFacade returns the candidate's current knowledge.

5. AdaptiveContentFacade asks TalentMS to request the required knowledge for a particular competency.

6. TalentMSFacade returns a list of competencies.

7. Having the current knowledge of the Candidate Candidate in need of a competency, AdaptiveContentFacade requests that the content of the competencies specized in the AdaptiveContentService be obtained.

8. AdaptiveContentService queries knowledge content to AdaptiveContentDAO.

9. AdaptiveContentDAO retrieves knowledge content set.

10. AdaptiveContentDAO transmits the removed content to the AdaptiveContentService.

11. AdaptiveContentService transmits AdaptiveContentDAO-derived content to AdaptiveContentFacade.

12. AdaptiveContentFacade performs mapping of the content on the knowledge it serves and the knowledge already obtained by the candidate. In the case employee proved his knowledge in the topic, it does not make sense to take the course again. Unnecessary content is removed and adapted content is passed to the employee.

According to mentioned above, user interface was developed that supports following functionality: resource manager or any person, responsible for project team forming, can adjust facets according to specified needs regarding the open position.

This behavior can be observed from the figure 8.

As a result, user interface was developed that supports following functionality: resource manager or any person, responsible for project team forming, can adjust facets according to specified needs regarding the open position. After the search for applicable people is executed, moderator can select person from list result set and apply it to the project.

In case any skill gaps are identified, the employee, suggested to the project, will receive a notization about assigned courses that are visible in the account. This page component is integrated with LMS System, after the press onto the "Enroll" button, employee is redirected to the learning material, managed by LMS.

The experimental usage of the developed approach in the practice of candidates learning for an employment in the IT-company "Academy – Smart" LTD, Kharkiv [21] was handled for 5 models: set of topics and time needed to get relevant understanding of them and the results are introduced in the table 1.

With this study we proposed the approach of learning content selection that would help to reduce the time for skill boosting process. Therefore, the time should be considered as the main measurement.

As a concrete example the real course from learning portal was introduced and the model of employee's skill level was built through the graph. According to the model, the time for filling gaps in skills was calculated and compared to the time, needed for passing the whole material. Under the circumstances, the algorithm of course selection has proved itself as efficient approach.

Conclusions. In order to achieve the goal of the thesis, the following tasks have been completed.

1. The subject area was chosen for e-learning in small and medium-sized IT companies, according to which the approaches to personnel learning in terms of project requirements were analyzed.

2. The advantages and disadvantages of using corporate e-learning in the corporate sphere are identified. The purpose of such learning and motivation is determined. Based on the analysis of the subject area, it is concluded

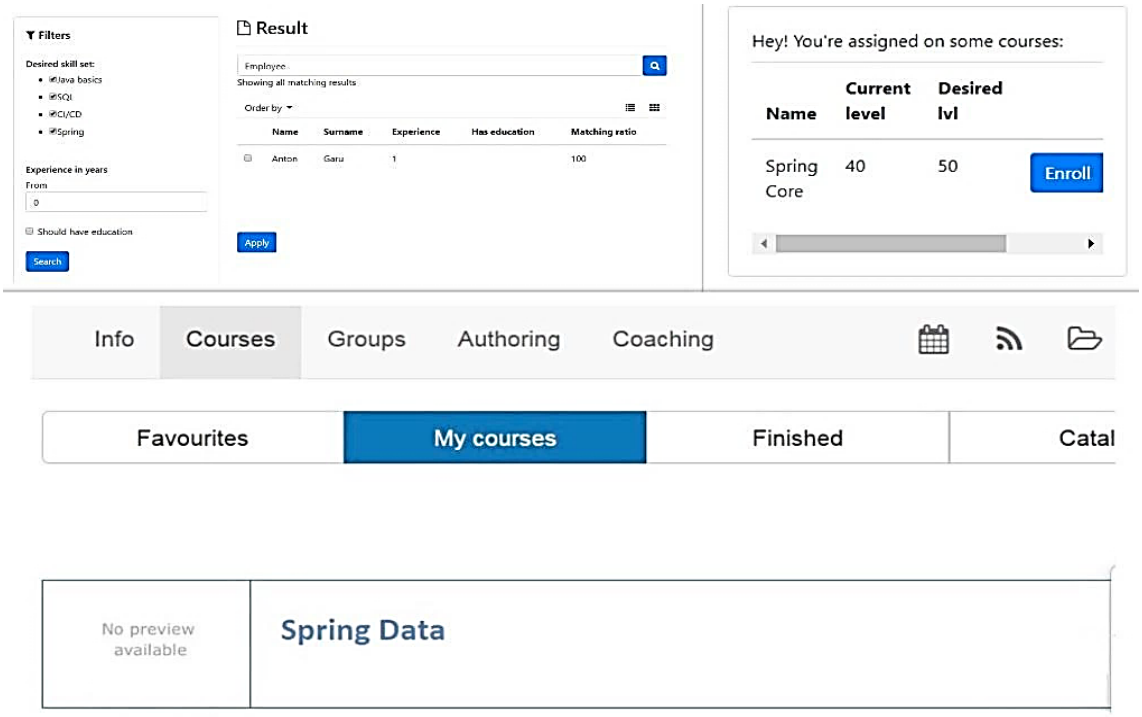


Fig. 8. GUI for resource and skill's management

Table 1 – Test cases for employees with gaps and time needed for covering them

№	Gaps	Course	Whole course time	Adopted learning time
1	JavaScript	HTML, CSS, and JavaScript for Web Developers [22]	Approx. 28 hours	Approx. 8 hours
2	CSS	HTML, CSS, and JavaScript for Web Developers [22]	Approx. 28 hours	Approx. 6 hours
3	HTML	HTML, CSS, and JavaScript for Web Developers [22]	Approx. 28 hours	Approx. 4 hours
4	Apache Spark for Hadoop	Hadoop Platform and Application Framework [23]	Approx. 23 hours	Approx. 6 hours
5	Data mining with Python	Python for data science [24]	Approx. 38 hours	Approx. 8 hours

that the need to develop software to implement an adaptive approach to the formation of educational content.

3. The characteristics and classification of modern e-learning systems of the personnel are given, the general structure of such systems and their typical functionality are analyzed, which made it possible to identify ways of improvement-learning systems and corporate adaptation options.

4. A model of competence structure display based on graph theory is proposed, sequential steps for selecting educational content for individual needs are visualized.

Therefore, the approach for creating adoptive learning content was suggested, that enables resource managers to form teams automatically and according to project needs, and to provide employees with learning material that corresponds their individual level. The main benefit and the efficiency of this approach is that costs for learning are reduced significantly. In the demonstrated example, period needed for learning, was reduced in 5 times. This goal is achieved by minifying the learning content to be a perfect fit with regard to employee's skills and requirements for the staff.

References

1. *Sokol V. E., Tkachuk M. V., Vasetka Y. M.* Adaptive Training System for IT–companies Personnel: Design Principles, Architectural Models and Implementation Technology. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. Сер. : Системний аналіз, управління та інформаційні технології.* Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 51 (1272). С.38–43.
2. Ткачук М. В., Сокол В. Є., Білова М. О., Космачов О. С. Класифікація, типова функціональність та особливості

застосування систем електронного навчання та тренінгу персоналу в IT-компаніях. *Сучасні інформаційні системи*. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. Т. 2, № 4. С. 87–95.
3. Bakar M. S. A., Jalil D., Udin Z. M. Knowledge Repository: Implementing Learning Management System into Corporate Environment. *Journal of Telecommunication, Electronic, Computer Engineering*. Durian Tunggal: UTeM, 2017. Vol. 9, no. 2–12. P. 141–145.
4. Atkinson P. E., Howells G., Reilly M., Ross C. Have you got an e-learning strategy yet? *Management Services*. Lichfield: Institute of Management Services, 2012. Vol. 56 (2). P. 43–47.
5. de Oliveira P. C. A Knowledge-Based Framework to Facilitate E-training Implementation. Lisboa: Univ. Nova de Lisboa. 66 p.
6. Kimiloglu H., Ozturan M., Kutlu B. Perceptions about and attitude toward the usage of e-learning in corporate training. *Computers in Human Behavior*. 2017. P. 339–349.
7. Benninck R. Implementing e-learning from the corporate perspective. *Knowledge Tree e-journal*, 2004. URL: http:// wikieducator.org/images/8/83/Bennink.pdf (останнє звернення 10.05.2020).
8. Batalla-Busquets J., Pacheco-Bernal C. On-the-job e-learning: Workers' attitudes and perceptions. *The International Review of Research in Open and Distance Learning*. Athabasca: Athabasca University, 2013. Vol. 14 (1). P. 40–64.
9. McCarthy N., Neville K., Pope A., Gallagher A., Nussbaumer A., Steiner C. M. The creation of a training model to support decisionmaking of emergency management practitioners: a design research study. *Journal of Decision Systems*. 2016. Vol. 25, no. s1. P. 558–565.
10. Gwebu K., Wang J. The role of organizational, environmental and human factors in e-learning diffusion. *International Journal of Web-Based Learning and Teaching Technologies.* IGI Global, 2007. Vol 2 (2). P. 59–78.
11. Ellis P. F., Kuznia K. D. Corporate elearning impact on employees. *Global journal of business research.* Hilo: The Institute for Business and Finance Research, 2014. Vol. 8 (4). P. 1–16.
12. *eLearning Industry*. URL: https://elearningindustry.com/ (останнє звернення 12.05.2020).
13. Ching H. S., McNaught C., Poon P. W. T Effective Technology-Mediated Education for Adult Chinese Learners. *Encyclopedia of Distance Learning. The Turkish Online Journal of Distance Education*. 2005. Vol. 6. P. 724–731.
14. Almrashdeh I. A., Sahari N., Zin N. A. M., Alsmadi M. Distance learning management system requirements from student's perspective. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. JATIT, Islamabad, 2011. Vol. 24 (1). P. 17–27.
15. Charles P., Bloom R. B. L. Facilitating the Development and Use of Interactive Learning Environments. CRC Press, 1998. 295 p.
16. Nour M., Abed E., Hegazi N. A proposed student model algorithm for an intelligent tutoring system. *SICE '95. Proceedings of the 34th SICE Annual Conference. International Session Papers.* Hokkaido, Japan, 1995. P. 1327–1333.
17. *European e-Competence Framework 3.0*. URL: http://ecompetences.eu/wp-content/uploads/2014/02/European-e-Competence-Framework-3.0_CEN_CWA_16234-1_2014.pdf (останнє звернення 15.05.2020).
18. Trudeau R. J. *Introduction to Graph Theory*. Dover Publications Inc., 1994. – 240 p.
19. Emmenegger J-F., Chable D. L., Nour E., Hassan A., Knolle H. *Sraffa and Leontief Revisited. Mathematical Methods and Models of a Circular Economy*. De Gruyter, 2020. 572 p.
20. *Master CICD and DevOps: Jenkins Complete Tutorial Course*. URL: https://www.udemy.com/course/jenkins-course-devops-cicd-complete-reference/ (останнє звернення 12.05.2020).
21. *Official Web-site of the "Academy Smart" IT-company*. URL: https://academysmart.com.ua/ (останнє звернення 10.05.2020).
22. *Coursera: HTML, CSS, and Javascript for Web Developers*. URL: https://www.coursera.org/learn/html-css-javascript-for-web-developers/ (останнє звернення 12.05.2020).
23. *Coursera: Hadoop Platform and Application Framework*. URL: https://www.coursera.org/learn/hadoop/ (останнє звернення 12.05.2020).
24. *Coursera: Python for data science*. URL: https://www.coursera.org/learn/python-for-data-science/ (останнє звернення 12.05.2020).

References (transliterated)

1. *Sokol V. E., Tkachuk M. V., Vasetka Y. M.* Adaptive Training System for IT–companies Personnel: Design Principles, Architectural Models and Implementation Technology. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2017, no. 51 (1272), pp. 38–43.
2. Tkachuk M. V., Sokol V. E., Bilova M. O., Kosmachev O. S. Klasyfikatsiia, typova funktsionalnist ta osoblyvosti zastosuvannia system elektronnoho navchannia ta treninhu personalu v IT-kompaniiakh [Classification, typical functionality and application peculiarities of learning management systems and training management systems at IT-companies]. *Suchasni informatsiini systemy* [Modern Informational Systems] Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, vol. 2, no 4, pp. 87–95.
3. Bakar M. S. A., Jalil D., Udin Z. M. Knowledge Repository: Implementing Learning Management System into Corporate Environment. *Journal of Telecommunication, Electronic, Computer Engineering*. Durian Tunggal: UTeM, 2017, vol. 9, no. 2–12, pp. 141–145.
4. Atkinson P. E., Howells G., Reilly M., Ross C. Have you got an e-learning strategy yet? *Management Services*. Lichfield: Institute of Management Services, 2012, vol. 56 (2), pp. 43–47.
5. de Oliveira P. C. A Knowledge-Based Framework to Facilitate E-training Implementation. Lisboa, Univ. Nova de Lisboa Publ. 66 p.
6. Kimiloglu H., Ozturan M., Kutlu B. Perceptions about and attitude toward the usage of e-learning in corporate training. *Computers in Human Behavior*. 2017, pp. 339–349.
7. Benninck R. Implementing e-learning from the corporate perspective. *Knowledge Tree e-journal*, 2004. Available at: http:// wikieducator.org/images/8/83/Bennink.pdf (accessed 10.05.2020).
8. Batalla-Busquets J., Pacheco-Bernal C. On-the-job e-learning: Workers' attitudes and perceptions. *The International Review of Research in Open and Distance Learning*. Athabasca: Athabasca University Publ., 2013, vol. 14 (1), pp. 40–64.
9. McCarthy N., Neville K., Pope A., Gallagher A., Nussbaumer A., Steiner C. M. The creation of a training model to support decisionmaking of emergency management practitioners: a design research study. *Journal of Decision Systems*. 2016, vol. 25, no. s1, pp. 558–565.
10. Gwebu K., Wang J. The role of organizational, environmental and human factors in e-learning diffusion. *International Journal of Web-Based Learning and Teaching Technologies.* IGI Global, 2007, vol 2 (2), pp. 59–78.
11. Ellis P. F., Kuznia K. D. Corporate elearning impact on employees. *Global journal of business research.* Hilo: The Institute for Business and Finance Research, 2014, vol. 8 (4), pp. 1–16.
12. *eLearning Industry*. Available at: https://elearningindustry.com/ (accessed 12.05.2020).
13. Ching H. S., McNaught C., Poon P. W. T Effective Technology-Mediated Education for Adult Chinese Learners. *Encyclopedia of Distance Learning. The Turkish Online Journal of Distance Education*. 2005, vol. 6, pp. 724–731.
14. Almrashdeh I. A., Sahari N., Zin N. A. M., Alsmadi M. Distance learning management system requirements from student's perspective. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. JATIT, Islamabad, 2011, vol. 24 (1), pp. 17–27.
15. Charles P., Bloom R. B. L. Facilitating the Development and Use of Interactive Learning Environments. CRC Press, 1998. 295 p.
16. Nour M., Abed E., Hegazi N. A proposed student model algorithm for an intelligent tutoring system. *SICE '95. Proceedings of the 34th SICE Annual Conference. International Session Papers.* Hokkaido, Japan, 1995, pp. 1327–1333.
17. *European e-Competence Framework 3.0*. Available at: http://ecompetences.eu/wp-content/uploads/2014/02/European-e-Competence-Framework-3.0_CEN_CWA_16234-1_2014.pdf (accessed 12.05.2020).
18. Trudeau R. J. *Introduction to Graph Theory*. Dover Publications Inc., 1994. 240 p.
19. Emmenegger J-F., Chable D. L., Nour E., Hassan A., Knolle H. *Sraffa and Leontief Revisited. Mathematical Methods and Models of a Circular Economy*. De Gruyter, 2020. 572 p.

20. *Master CICD and DevOps: Jenkins Complete Tutorial Course*. Available at: https://www.udemy.com/course/jenkins-course-devops-cicd-complete-reference/ (accessed 12.05.2020).
21. *Official Web-site of the "Academy Smart" IT-company*. Available at: https://academysmart.com.ua/ (accessed 10.05.2020).
22. *Coursera: HTML, CSS, and Javascript for Web Developers*. Available at: https://www.coursera.org/learn/html-css-javascript-for-web-developers/ (accessed 12.05.2020).
23. *Coursera: Hadoop Platform and Application Framework*. Available at: https://www.coursera.org/learn/hadoop/ (accessed 12.05.2020).
24. *Coursera: Python for data science*. Available at: https://www.coursera.org/learn/python-for-data-science/ (accessed 12.05.2020).

Received 15.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сокол Володимир Євгенович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4689-3356; e-mail: vlad.sokol@gmail.com

Бронін Сергій Вадимович – кандидат технічних наук, доцент, Київський Національний Університет імені Тараса Шевченка, доцент кафедри інформаційних систем і технологій; м. Київ, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3094-0450; email: sbronin@me.com

Карнаух Віра Едуардівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7130-0922; e-mail: vverasha@gmail.com

Білова Марія Олексіївна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7002-4698; e-mail: missalchem@gmail.com

Сокол Владимир Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4689-3356; e-mail: vlad.sokol@gmail.com

Бронин Сергей Вадимович – кандидат технических наук, доцент, Киевский Национальный Университет имени Тараса Шевченко, доцент кафедры информационных систем и технологий; г. Киев, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3094-0450; email: sbronin@me.com

Карнаух Вера Эдуардовна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7130-0922; e-mail: vverasha@gmail.com

Белова Мария Алексеевна – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7002-4698; e-mail: missalchem@gmail.com

Sokol Volodymyr Yevhenovych – PhD, Associate Professor, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4689-3356; e-mail: vlad.sokol@gmail.com

Bronin Sergiy Vadymovich – PhD, Associate professor, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies; Kyiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3094-0450; email: sbronin@me.com

Karnaukh Vira Eduardivna – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», student; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7130-0922; e-mail: vverasha@gmail.com

Bilova Mariia Oleksiivna – PhD, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7002-4698; e-mail: missalchem@gmail.com

УДК 004.75 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.18**

Я. О. КЛЮЧКА, О. В. ШМАТКО

ПОРІВНЯННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН І СПРЯМОВАНОГО АЦИКЛІЧНОГО ГРАФА ПРИ ЗБЕРІГАННІ І ОБРОБЦІ ДАНИХ В РОЗПОДІЛЕНОМУ РЕЄСТРІ

Розглядається технологія розподіленого реєстру, яка є революційним підходом до запису та обміну даними між декількома сховищами даних. Виділяються та описуються ключові особливості технології розподіленого реєстру. Особливу увагу приділено технології блокчейн і спрямованому ациклічному графу. Описується принцип роботи технології блокчейн. Графічно представлені та описані всі етапи, які проходять транзакції перед тим, як вони будуть додані в ланцюжок блоків. Описуються всі основні переваги технології блокчейн, а також представлені ключові недоліки мережі. При описі обмежень технології блокчейн були представлені реальні відомості, які підтверджують наявні недоліки даної технології. Завдяки оптимізованому механізму консенсусу, високій масштабованості та можливості здійснювати мікротранзакції, стрімко починає розвиватися технологія спрямованого ациклічного графа. Описується принцип роботи спрямованого ациклічного графа і чим орграф відрізняється від технології блокчейн. Описано основні переваги спрямованого ациклічного графа, які орграф успадкував від блокчейну і поліпшив завдяки своїй структурі. При порівнянні регістрів на основі спрямованого ациклічного графа і блокчейну можна виявити цікаві аспекти платформ. Незважаючи на очевидну подібність між парадигмами, відмінності також зберігаються. На підставі отриманих результатів стає очевидним, що майбутнє технології розподіленого реєстру величезне. Оскільки спрямований ациклічний граф завдяки своїй структурі та перевагам вже затьмарив архітектуру блокучейну. Поява спрямованого ациклічного графа дозволить технології розподіленого реєстру впровадитися в усі сфери діяльності у глобальному масштабі.

Ключові слова: технологія розподіленого реєстру, блокчейн, спрямований ациклічний граф, консенсус, транзакція, децентралізація

Я. А. КЛЮЧКА, А В .ШМАТКО

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН И НАПРАВЛЕННОГО АЦИКЛИЧЕСКОГО ГРАФА ПРИ ХРАНЕНИИ И ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ В РАСПРЕДЕЛЕННОМ РЕЕСТРЕ

Рассматривается технология распределенного реестра, которая является революционным подходом к записи и обмену данными между несколькими хранилищами данных. Выделяются и описываются ключевые особенности технологии распределенного реестра. Особое внимание уделено технологии блокчейн и направленному ациклическому графу. Описывается принцип работы технологии блокчейн. Графически представлены и описаны все этапы, которые проходят транзакции перед тем, как они будут добавлены в цепочку блоков. Описываются все основные преимущества технологии блокчейн, а также представлены ключевые недостатки сети. При описании ограничений технологии блокчейн были представлены реальные сведения, которые подтверждают существующие изъяны данной технологии. Благодаря оптимизированному механизму консенсуса, высокой масштабируемости и возможности осуществлять микротранзакции, стремительно начинает развиваться технология направленного ациклического графа. Описывается принцип работы направленного ациклического графа и чем орграф отличается от технологии блокчейн. Описаны основные преимущества направленного ациклического графа, которые орграф унаследовал от блокчейна и улучшил благодаря своей структуре. При сравнении регистров на основе направленного ациклического графа и блокчейна можно выявить интересные аспекты платформ. Несмотря на очевидное сходство между парадигмами, различия также сохраняются. На основании полученных результатов становится очевидным, что будущее технологии распределенного реестра огромное. Поскольку направленный ациклический граф благодаря своей структуре и преимуществам уже затмил архитектуру блокчейна. Появление направленного ациклического графа позволит технологии распределенного реестра внедриться во все сферы деятельности в глобальном масштабе.

Ключевые слова: технология распределенного реестра, блокчейн, направленный ациклический граф, консенсус, транзакция, децентрализация

Y. O. KLIUCHKA, O. V. SHMATKO

COMPARISON OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY AND DIRECTED ACYCLIC GRAPH DURING DATA STORAGE AND PROCESSING IN A DISTRIBUTED REGISTRY

The technology of distributed registry, which revolutionary approach to recording and exchanging data between multiple data warehouses, is considered. The key features of distributed registry technology are highlighted and described. Particular attention is paid to blockchain technology and a directed acyclic graph. The principle of the operation of blockchain technology is described. All stages that go through transactions before they are added to the blockchain are graphically presented and described. All the main advantages of blockchain technology are described, and key network disadvantages are also presented. In describing the limitations of blockchain technology, real information was presented that confirms the existing flaws of this technology. Thanks to the optimized consensus mechanism, high scalability and the ability to carry out microtransactions, the technology of a directed acyclic graph is rapidly developing. The principle of operation of a directed acyclic graph is described and how the digraph differs from blockchain technology. The main advantages of a directed acyclic graph are described, which the digraph inherited from the blockchain and improved due to its structure. When comparing registers based on a directed acyclic graph and blockchain, interesting aspects of platforms can be identified. Despite the obvious similarities between paradigms, differences also persist. Based on the results, it becomes apparent that the future of distributed ledger technology is huge. Since a directed acyclic graph, due to its structure and advantages, has already overshadowed the blockchain architecture. The appearance of a directed acyclic graph will allow distributed registry technology to be introduced into all areas of activity on a global scale.

Keywords: distributed registry technology, blockchain, directed acyclic graph, consensus, transaction, decentralization

Вступ. Хтось вважає технологію розподіленого реєстру (ТРР) лише порожнім звуком. Інші бачать в ній революційну технологію, яка змінить спосіб обміну практично всім, що має цінність. Так що ж це за технологія так званого розподіленого реєстру, як вона працює і кому вона вигідна [1]?

Технологія розподіленого реєстру (distributed ledger technology або DLT, ТРР) – це технологія зберігання інформації, ключовими особливостями якої є:

- спільне використання та синхронізація цифрових даних відповідно до алгоритму консенсусу;
- географічний розподіл рівнозначних копій в різних точках по всьому світу;

© Я. О. Ключка, О. В. Шматко, 2020

- відсутність центрального адміністратора [2].

Відсутність єдиного центру управління означає, що контроль над реєстром здійснюють кілька учасників системи або всі учасники, в залежності від типу розподіленого реєстру. Ключовою особливістю технології розподіленого реєстру (РРР) є те, що кожен користувач має свою власну, ідентичну копію реєстру, яка автоматично оновлюється. З цього випливає, що внесений до реєстру запис неможливо видалити або підробити. Оскільки копії географічно віддалені один від одного і для хакерської зміни даних потрібно провести атаку відразу на всі вузли мережі. Для додавання нового запису до реєстру необхідно досягти так званого консенсусу. Консенсус – угода, яка задовольняє кожну з залучених сторін. Як тільки консенсус досягнутий, розподілений реєстр оновлюється, і у кожного учасника мережі зберігається остання узгоджена версія реєстру.

Розподілені реєстри представляють нову парадигму збору і передачі інформації. Вони здатні докорінно змінити способи взаємодії між фізичними особами, підприємствами та державними органами. РРР істотно зменшує витрати на довіру. Архітектура і структура розподілених реєстрів допоможе людям зменшити залежність від банків, державних органів, юристів, нотаріальних контор [3].

РРР розпочала свій шлях, як основа для криптовалют і з раптовим зростанням популярності біткоїна за останні роки істотно просунулася вперед. Блокчейн був першим повністю реалізованим прикладом РРР [1]. Однак, за останній час блокчейн зарекомендував себе, як недосконала технологія: він неефективний, дорогий і схильний до шахрайських маніпуляцій. Системна неефективність і проблеми масштабування привели до того, що розробники почали шукати рішення поза блокчейну. Тому з'явилися проекти, які пропонують більш радикальний підхід до усунення проблем блокчейну. Дослідники побудували абсолютно нові мережі, які взагалі не використовують структуру даних блокчейн. Замість блокчейну експерти використовують спрямований ациклічний граф (directed acyclic graph, DAG). Поява нового рішення, яке в основному відрізняються від блокчейну призвело до дискусій щодо того, яка мережа є найкращою [4]. Тому актуальним є порівняти DAG і технологію блокчейн (ТБ). Науковий внесок даного дослідження є таким:

- порівняльний аналіз принципів роботи технології блокчейн (ТБ) і DAG;
- виявлення та аналіз відмінностей, які з'являються в досягнені консенсусу і структурі даних.

На підставі цього в статті будуть проаналізовані парадигми та виявлені їх сильні і слабкі сторони.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Загалом позиції дослідників можна розділити на дві умовні групи. До першої групи входять дослідження, в яких автори описують РРР, ключові особливості РРР і ТБ. До другої групи – дослідження, в яких описується застосування ТБ в різних галузях – фінансовій сфері, освіті, охороні здоров'я. Нижче описуються найбільш показові приклади з кожної групи.

В роботі [5] наведені кроки для вивчення та оцінки областей, де РРР потенційно може бути інтегрована у діяльність фінансового сектора Світового банку. Встановлено, що РРР все ще перебуває на ранній стадії розробки, і для того, щоб повністю реалізувати потенціал технології, необхідно вирішити багато проблем. Наприклад, питання, пов'язані з конфіденційністю, безпекою, масштабованістю, взаємодією, а також правовими та регулюючими питаннями.

Результати дослідження, які підтверджують, що РРР має потенціал для підвищення ефективності та зменшення витрат на розрахунки з цінних паперів представлені в роботі [6]. Однак автори зазначили, якщо розрахунок з цінних паперів на основі РРР стане реальністю, то швидше за все, РРР буде зосереджена серед небагатьох постачальників. Це може призвести до неефективного монопольного ціноутворення або ефективної цінової дискримінації, оскільки постачальники послуг захоплюють значну частину ринкового надлишку.

В роботі [7] представлено порівняльний аналіз найбільш популярних технологій розподіленого реєстру (РРР) на основі DAG, зокрема Nxt, IOTA, Orumesh, DagCoin, Byteball, Nano і XDAG. Описано принцип роботи класичного блокчейну і його недоліки. Основними обмеженнями блокчейну є: масштабованість, консенсус, майнінг, комісія. Варіантом подолання відповідних обмежень може бути використання РРР на основі DAG.

Використання DAG в контексті розподілених реєстрів проаналізовано в роботі [8]. Порівнюється DAG з рішеннями на основі ТБ. Порівняльний якісний аналіз проводиться з використанням трьох еталонних реалізацій: Bitcoin і Ethereum служать еталонними реалізаціями для блокчейну, а Nano використовується для представлення DAG.

В роботі [9] розглянуті особливості інновацій, що лежать в основі технології розподілених реєстрів (РРР), потенційні і фактично реалізовані напрями застосування, організаційні форми відповідних проектів. Показано, що навіть максимальне поширення РРР не означатиме перемогу мереж над ієрархіями і демократизацію. По-перше, тому, що будь-яким мережам властиві процеси подальшої ієрархізації. По-друге, відновлення ієрархічного порядку може виявитися необхідним для запобігання сповзанню в анархію.

В роботі [10] досліджено децентралізоване сховище даних, представлене технологією блокчейн, і можливості розвитку даної технології в області логістики та управління ланцюгами поставок. Виявлено, що основні проблеми в логістиці, такі як затримка замовлення, пошкодження товару, помилки і багатократне введення даних, також можуть бути мінімізовані шляхом впровадження ТБ. В роботі [11] представлено, як блокчейн допоможе знизити логістичні витрати і оптимізувати операції і дослідницькі завдання. Впровадження ТБ у ланцюг поставок є перспективним вдосконаленням, придатним для надання переваг всім різним учасникам процесу.

Різні застосування ТБ в галузі охорони здоров'я описані в роботі [12]. Визначено основні дослідницькі ініціативи, а також майбутні дослідницькі можливості. Виявлено, що використання ТБ гарантує, що дані про пацієнта дійсно будуть належати і контролюватися законним власником даних, тобто пацієнтом. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з транскордонним обміном даних про стан здоров'я, коли існують різні і часто конфліктуючі юрисдикції. Іншою потенційною проблемою, яка недостатньо досліджена, є здатність даної технології своєчасно зберігати і обробляти масивні транзакції доступу до даних. В роботі [13] представлено систематичний огляд поточних досліджень щодо застосування ТБ у галузі охорони здоров'я. Показано, що в ряді досліджень були запропоновані різні варіанти використання блокчейну в галузі охорони здоров'я. Однак не вистачає адекватних реалізацій прототипу і досліджень для характеристики ефективності цих запропонованих варіантів використання. Отже, все ще необхідні додаткові дослідження, щоб краще зрозуміти, охарактеризувати і оцінити корисність блокчейну в галузі охорони здоров'я.

В роботі [14] представлено систематичний огляд наукових досліджень, присвячених вивченню застосування ТБ в освіті. Виявлено, що застосування ТБ в сфері освіти знаходиться в зародковому стані. Технологія блокчейн (ТБ) в основному використовується для видачі та перевірки академічних атестатів, обміну знаннями та досягненнями учнів, оцінки їх професійних здібностей.

Аналіз показує, що великий інтерес до TPP та блокчейну проявляють організації фінансової сфери та люди, які цікавляться криптовалютой. Однак з появою TPP на основі DAG багато дослідників вважають, що DAG є альтернативою блокчейну, який вирішує всі його недоліки. Тому необхідно зрозуміти, що такого особливого в DAG і чим орграф кращий за блокчейн. Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення порівняльного аналізу DAG та ТБ.

Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є проведення порівняльного аналізу ТБ і DAG з урахуванням наступних функцій: незмінність, безпека і децентралізація, щодо використання цих технологій при створенні розподіленого реєстру.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати огляд принципу роботи децентралізованого реєстру на основі ТБ і DAG;
- виконати порівняльний аналіз TPP на основі блокчейну та DAG, виявити переваги та недоліки розглянутих технологій.

Аналіз принципу роботи децентралізованих реєстрів

Аналіз принципу роботи технології блокчейн

Блокчейн – це багатофункціональна і багаторівнева інформаційна технологія, призначена для надійного обліку різних активів. Потенційно ця технологія охоплює всі без винятку сфери економічної діяльності та має безліч галузей застосування. Серед них: фінанси, економіка і грошові розрахунки, а також операції з матеріальними (реальна власність, нерухомість, автомобілі тощо) і нематеріальними (право голосування, ідеї, репутація, наміри, медичні дані, особиста інформація тощо) активами. Блокчейн створює нові можливості з пошуку, організації, оцінки та передачі будь-яких дискретних одиниць. Власне кажучи, це нова організаційна парадигма для координації будь-якого виду людської діяльності [15].

У літературі існує безліч різних визначень ТБ і в багатьох публікаціях на це питання дається своє власне унікальне визначення. В статті буде використовуватися тлумаченням цього визначення, яке пропонується в роботі [16]. Блокчейн – це пірінговий криптографічно захищений розподілений, (практично) незмінний реєстр, який підтримує тільки додавання блоків і оновлюється лише в результаті угоди (домовленості) між усіма учасниками. На рис. 1 представлено принцип роботи ТБ.

Коли в блокчейн надходить нова інформація, її повинні перевірити на істинність і підтвердити всі користувачі блокчейну (в якості користувачів виступає

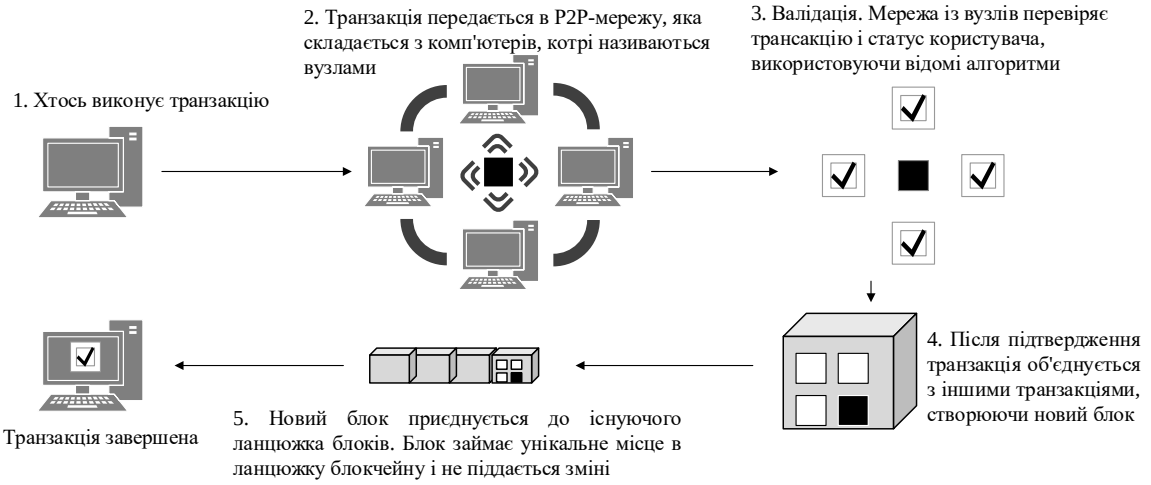


Рис. 1. Принцип роботи ТБ

підключене до блокчейну обладнання, тому всі операції виконуються миттєво). Перевірка і підтвердження інформації здійснюється за допомогою алгоритмів консенсусу: Proof-of-Work (доказ виконаної роботи, PoW), Proof-of-Stake (доказ володіння, PoS) та інші. Як тільки всі користувачі підтвердили істинність інформації, створюється блок, що містить кілька одиниць інформації (наприклад, кілька транзакцій). Кожен блок несе в собі не тільки інформацію, що надійшла, а також мітку часу і посилання на попередній блок. За допомогою цього вміст кожного блоку можна буде перевірити.

Новий блок послідовно приєднується до ланцюжка таких же блоків. Ланцюжок блоків містить інформацію про всі вчинені коли-небудь операції в базі. Весь ланцюжок з одним і тим же набором інформації зберігається у кожного учасника блокчейну на багатьох комп'ютерах по всьому світу. Переписати інформацію в блоці не можна, бо зміна будь-якого блоку призведе до змін у всьому ланцюжку. Оскільки ланцюжок зберігається на багатьох комп'ютерах, інформація в ньому буде відрізнятися, і інші учасники ланцюжка просто її проігнорують (для них вона буде невірною) [17].

Криптографія лежить в основі TPP, зокрема для блокчейн-реалізацій. Кожен новий запис даних, є «хешованим», що означає, що до оригінального повідомлення застосовується криптографічна хеш-функція. Хеш-функція бере дані будь-якого розміру і вводить цифровий відбиток, подібний до людського відбитка, який неможливо змінити, якщо самі дані не будуть змінені. Хеш-вихід – це так званий «дайджест» визначеної довжини. Візьмемо для прикладу алгоритм SHA-256 і продемонструємо роботу хеш-функції. Візьмемо просте слово «блокчейн», результатом хеш-функції для такого слова буде наступний хеш: e6c5e23a451f292eff31cb44edc2c89394fbfc5d9d25a85fabde02a4c0a4db90. Тепер змінимо вхідне слово «Блокчейн», результатом буде наступний хеш: 0bf5b3c53e2da83eafd74b401d7b16c4c4a3dd4fa292f81ef491734fe19c42c8. Це означає, що для одного оригінального введення можливий лише один хеш, і для іншого введення малоймовірно мати те саме хеш-значення.

На рис. 2 представлена схема підтвердження правомірності здійснення транзакції.

Блокчейн складається з послідовності блоків, які зберігаються та копіюються між загальнодоступними серверами.

Кожен блок складається з чотирьох основних елементів: хеш попереднього блоку; вміст даних блоку (тобто записи книги); поняття, яке використовується для надання хешу певної форми; хеш блоку.

Включаючи хеш попереднього блоку, кожен наступний блок посилює заявку на достовірність попереднього блоку. Блоки на початку ланцюга не можуть бути змінені без зміни всіх наступних блоків. Аналогічно, додавання даних у хеш робить дані немодифікованими без порушення послідовності.

Ще однією особливість блокчейну є використання пари цифрових закритого і відкритого ключів. Кожен учасник мережі має закритий ключ, який використовується для підпису цифрових повідомлень і відомий тільки окремому користувачеві. Відкритий ключ є загальнодоступним і використовується для перевірки особи відправника цифрового повідомлення (рис.3) [5].

Крім того, криптографія з відкритим ключем відіграє фундаментальну роль у безпеці блокчейну. В даний час в блокчейн використовується криптографія еліптичних кривих (ECC). Її безпека базується на нерозв'язності задачі дискретного логарифму еліптичної кривої. Основні функції криптографії відкритого ключа полягають у наступному.

Використання приватного ключа для створення підпису повідомлення, від якого підписант не може відмовитися. Захист від зловмисного підроблення повідомлення про транзакцію.

Публічний ключ використовується для участі в обміні адресами, як адреса прийому платежів.

Приватний ключ використовується для захисту та управління криптовалютою.

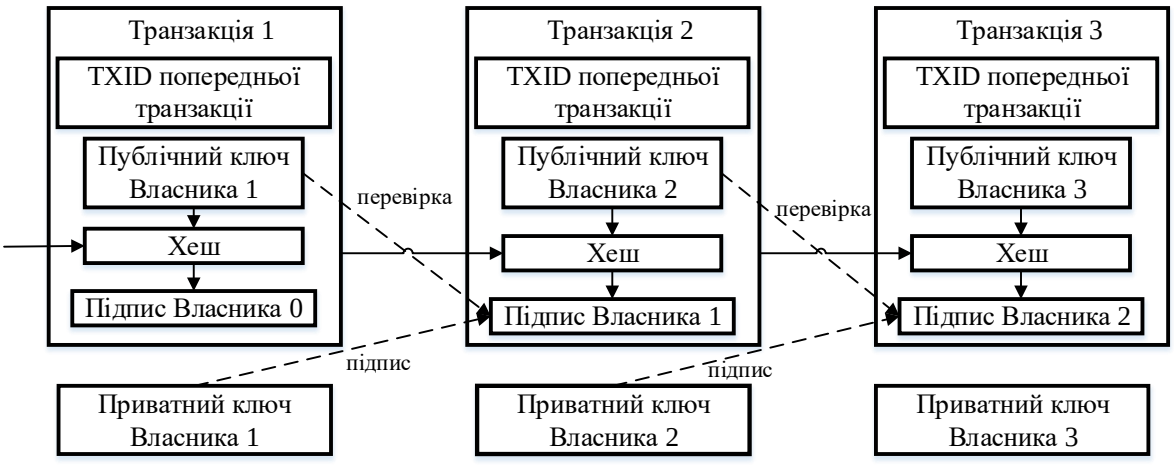


Рис. 2. Схема підтвердження правомірності здійснення транзакції

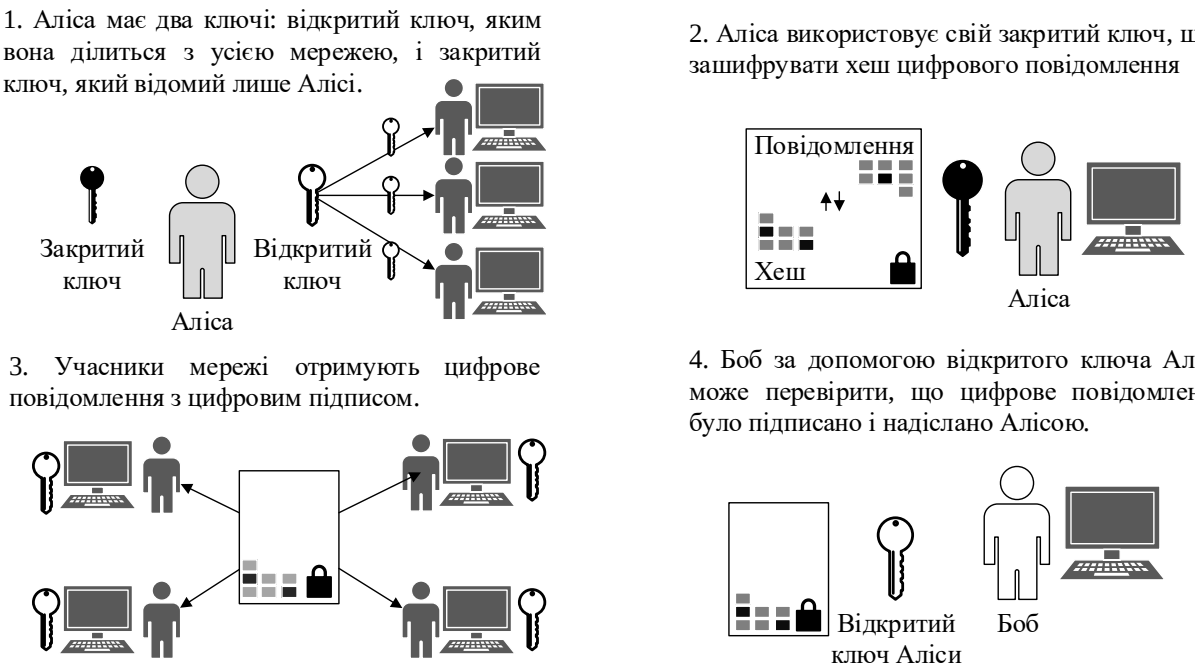


Рис. 3. Цифровий підпис в блокчейн

В даний час класичні криптографічні алгоритми використовується в ТБ. Захищеність класичного криптографічного алгоритму головним чином залежить від нерозв'язності задачі дискретної логарифмічної еліптичної кривої або задачі цілочислової факторизації.

Проте, завдяки дослідженням в області квантових обчислень, квантовий комп'ютер може мати потужні можливості паралельних обчислень, які стають великою загрозою для класичних криптографічних алгоритмів. Основними алгоритмами, які можуть становити небезпеку та використовуватися у контексті квантових обчислень та квантово-посилених атак є два основні алгоритми: Алгоритм Гровера та Алгоритм Шора. Перший – це алгоритм пошуку вхідних даних, щоб знайти унікальний вхід до функції чорного ящика, яка працює значно швидше, ніж пошук грубої сили, тим самим компрометуючи хеш-функції недостатньої довжини. Другий забезпечує пошук дискретних логарифмів і факторизації цілих чисел на квантовому комп'ютері, не просто за поліноміальний час, а за час, що не набагато перевершує час множення цілих чисел (тобто практично так само швидко, як відбувається саме шифрування). Ці проблеми лежать в основі злому алгоритмів RSA, DSA і ECDSA. У сукупності два квантові алгоритми становлять значну небезпеку для систем, що реалізують блокчейн. Агентство національної безпеки США (АНБ) і Національний інститут стандартів і технологій (NIST) відзначили, що необхідність переходу до квантово-стійких схем зростає. У 2015 NIST оголосив про свій план публічного виклику пост-квантових схем для створення нових стандартів криптографії з відкритим ключем.

Щоб протистояти атаці квантових обчислень пропонується пост-квантова криптографія. Зокрема, широко поширена думка, що заснована на решітці криптографія здатна протистояти атакам квантових комп'ютерів.

Аналіз принципу роботи спрямованого ациклічного графа

DAG є основною альтернативою блокчейну. DAG увібрав в себе всі переваги блокчейну і водночас покращує його недоліки. Але перш ніж мова піде про переваги DAG необхідно зрозуміти, як працює дана технологія і чим вона відрізняється від блокчейну.

DAG – орграф, в якому відсутні орієнтовані цикли, але можуть бути «паралельні» шляхи, що виходять з одного вузла і різними шляхами приходять в кінцевий вузол. Орграф відрізняється від блокчейну структурою записів і асинхронністю. Більшість людей вважають, що DAG – це тип блокчейну або якийсь новий консенсус. Однак і блокчейн, і DAG є різними рішеннями TPP. Простим прикладом DAG є генеалогічне дерево.

Структура DAG зберігає транзакції в вузлах (а не в блоках), де кожен вузол містить одну транзакцію. Крім цього, немає потреби в майнерах, оскільки кожна нова транзакція підтверджує дві інші транзакції. Відсутність майнерів також знижує витрати за транзакцію до мінімуму. Низька комісія за транзакцію відкриває для DAG ще одну важливу особливість – мікротранзакції.

Криптовалюта IOTA використовує DAG, Tangle, що в перекладі – «клубок» або «плутанина». Метою Tangle є створення криптовалюти для індустрії IoT. Основними особливостями IOTA є відсутність зборів і низьке енергоспоживання. В IOTA використовується принцип непрямого підтвердження транзакцій (рис. 4). Кожна нова транзакція посилається на певні дві попередні транзакції.

Транзакція 8 безпосередньо схвалює транзакції 5 і 6. Також вона побічно схвалює транзакції 1, 2 і 3. Таким чином, утворюється самокерована система, яка сама себе підтверджує [18].

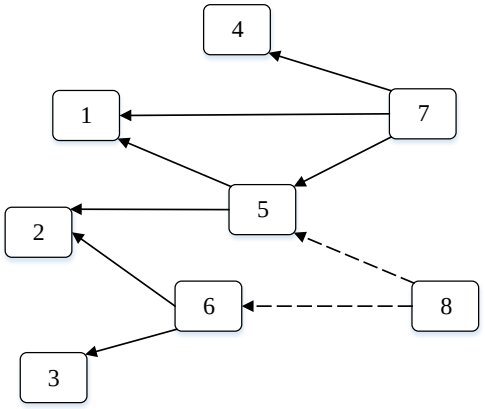


Рис. 4. Схвалення транзакцій

Порівняльний аналіз технології блокчейн та спрямованого ациклічного графа

Переваги та недоліки технології блокчейн

Створення ТБ принесло людству нові можливості, і знайшлися люди, які високо оцінили всі перспективи їх використання в реальному житті. Переваги даної технології обговорюються багатьма експертами, бо блокчейн універсальний і може застосовуватися практично у всіх галузях, забезпечуючи підвищену безпеку в сумнівних умовах. Тому потрібно визначити основні переваги ТБ.

Децентралізація і відмова від посередництва. Ключовим нововведенням даної технології є здійснення децентралізованих транзакцій, які не потребують довіри. Традиційний посередник (наприклад, банк), який би перевіряв транзакції в даній системі вже не потрібен. Замість цього користувачі покладаються на загальнодоступну розподілену базу даних, що зберігаються на багатьох децентралізованих вузлах і підтримується майнерами.

Прозорість транзакцій. Всі учасники мережі мають доступ до всієї історії транзакцій. Безумовна прозорість дозволяє кожному учаснику бачити всю історію транзакцій своїх контрагентів, яка ніколи не очищається.

Безповоротність транзакцій. У публічних блокчейнах кожна дія записується в ланцюжок блоків і повернути транзакції в початковий стан після підтвердження – включення їх до блоку не можна [19].

Економія. Для здійснення транзакції не потрібно вдаватися до послуг посередників. З цього випливає, що користувачі не несуть витрат, пов'язаних з роботою посередника.

Високий рівень безпеки. Всі транзакції криптографічно захищені, що забезпечує цілісність даних в мережі [16].

Прискорення операцій. Для повного проведення транзакції, як правило, банкам іноді потрібно кілька днів. Це пов'язано з протоколами в банківському програмному забезпеченні, а також тим, що банки працюють тільки в звичайні робочі години, п'ять днів на тиждень. Що стосується блокчейну, то дана технологія працює 24 години на добу, сім днів на тиждень.

У класичній архітектурі ТБ утворилося кілька проблем. Ці проблеми і обмеження ТБ змусили дослідників задуматися про інші варіанти ТРР. Далі будуть розглянуті основні обмеження класичної архітектури блокчейн.

Одне з найбільш актуальних питань, що перешкоджає впровадженню блокчейну в глобальному масштабі, є його масштабованість. Для того, щоб транзакція була включена в блок, необхідно вирішити задачу PoW. Таким чином, швидкість транзакцій обмежена періодичністю, з якою створюються блоки, а також розміром блоку. При збільшенні кількості вузлів в системі, частота створення блоків істотно не збільшується через те, що складність головоломки PoW є динамічною, завдяки чому час генерації блоків зводиться до фіксованого значення.

У Bitcoin блок видобувається приблизно кожні 10 хв з максимальним розміром блоку 1 МБ, тим самим обмежуючи швидкість транзакцій Bitcoin від 3 до 7 транзакцій в секунду (залежно від розміру окремих транзакцій) [8].

В Ethereum блок додається приблизно кожні 15 с з динамічним розміром блоку, який вимірюється не в байтах, а в газі. Газ (Gas) – це одиниця обчислення, яка використовується для розрахунку і сплати комісії за певну дію або транзакцію. Ліміт газу (Gas Limit) – це максимальна кількість газу, яку користувач готовий заплатити за проведення транзакції або виконання будь-якого циклу операцій [20]. В Ethereum це значення є динамічним і буде адаптуватися до умов мережі. Це дозволяє Ethereum здійснювати приблизно від 7 до 15 транзакцій в секунду Перехід на PoS повинен зменшити час генерації блоку Ethereum до 4 с або нижче, але це все ще досить обмежена швидкість генерації блоків [8].

Середнє значення часу, яке необхідне для додавання блоку в Bitcoin і Ethereum представлено на рис. 5.

Проблема масштабованості також грає ключову роль при перевантаженні блокчейну. Наприклад, в кінці листопада 2017 року в мережі Ethereum була запущена гра CryptoKitties. У зв'язку зі стрімким зростанням популярності гри серед членів криптоспільноти перекази CryptoKitties за перший тиждень становили до 20 % від усіх транзакцій мережі. В результаті на підтвердження всіх інших транзакцій стало йти багато часу. Оскільки основною проблемою є неефективний алгоритм консенсусу, витрати та час, які необхідні для здійснення цих переказів, виросли і вийшли з-під контролю.

Також грудневий зліт ціни Bitcoin до рекордних $19,783 привів до того, що на той період мемпул (мемпул – набір всіх транзакцій, які очікують підтвердження майнерами в мережі) біткоїна виріс до 200,000 непідтверджених транзакцій. Багато популярних кріптобірж не змогли впоратися з навантаженням і пішли в оффлайн. В результаті користувачі мережі були змушені платити високі комісії за транзакцію (до $ 32), щоб уникнути затримки підтвердження [21].

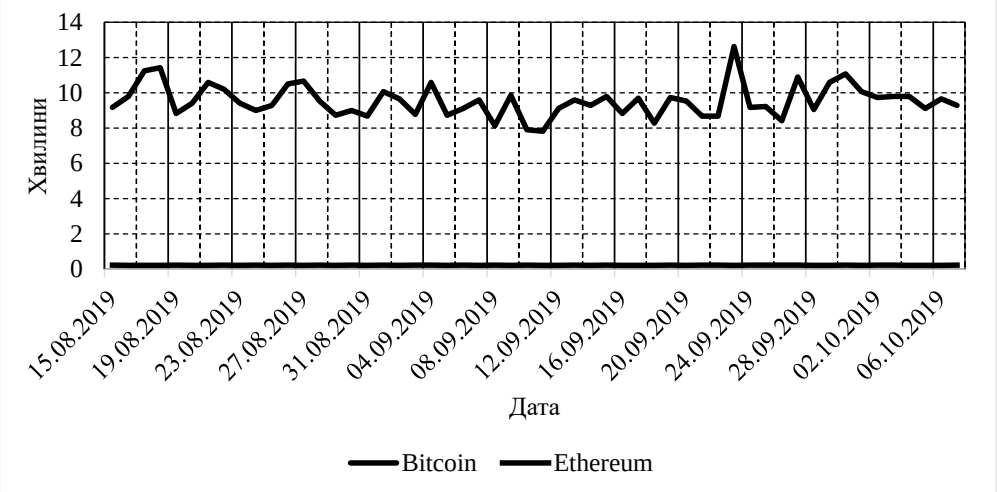


Рис. 5. Час додавання блоку

Іншим важливим недоліком є комісія за транзакцію для транзакцій будь-якої вартості (рис. 6). За проведення будь-якої транзакції в Ethereum стягується комісія, яку отримує майнер. Майнери мережі підтверджують транзакції і вирішують, які з них увійдуть до нового блоку мережі. Комісія за транзакцію обчислюється в газі, а оплачується в ефірі. Ефір (ETH) – це криптовалюта мережі Ethereum. Це робить його неефективним для сценаріїв, в яких беруть участь мікротранзакції. Транзакції, які складаються з невеликого платежу можуть також зайняти кілька днів, перш ніж вони будуть авторизовані.

Загальну вартість комісії за транзакцію в Ethereum можна розрахувати самостійно. Для цього потрібно помножити ліміт газу на його ціну. Ліміт і ціну газу відправник встановлює для кожної транзакції. Ціна газа (Gas Price) – це вартість однієї одиниці газа в Gwei. Gwei – це одиниця виміру ефіру. Один ефір дорівнює одному мільярду Gwei. Якщо виразити чисельно, то 1ETH=1 000 000 000 Gwei. Наприклад, якщо ліміт газу дорівнює 50,000 од., а ціна газу – 20 Gwei, то це означає, що відправник готовий витратити на виконання транзакції 0.001 ETH.

Наступним недоліком ТБ є те, що після додавання даних в блокчейн їх дуже складно модифікувати. Зміна даних або коду, як правило, вимагає великих зусиль і часто для цього необхідний hard fork. Проведення hard fork призводить до такого стану, що система поділяється на дві різні гілки. У користувачів є вибір вони можуть залишитися в старій мережі, не беручи при цьому правил нової, або ж вони можуть перейти в нову мережу, прийнявши нові правила [22].

Енергозатратність також є головним недоліком блокчейну. Оскільки майнінг висококонкурентний і кожні десять хвилин виграє тільки один майнер, робота інших майнерів втрачається. Тому майнери постійно намагаються збільшити свою обчислювальну потужність. Оскільки ті завдання, які раніше можна було виконати на звичайному комп'ютері, тепер під силу вирішити тільки майнінговим фермам, які споживають колосальні обсяги електроенергії [22]. Згідно з дослідженням, яке провела консалтингова компанія Bloomberg New Energy Finance, витрати електроенергії для майнінгу біткоіна за 2017 р. досягли 37 ГВт-год в день. Це еквівалентно приблизно 30 ядерним реакторам потужністю 1.2 ГВт, що працюють на максимум [23].

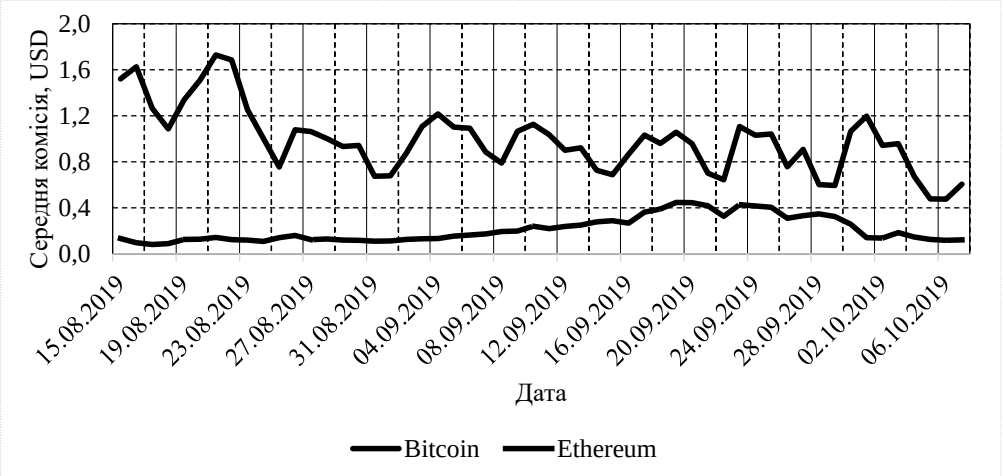


Рис. 6. Середня комісія за транзакцію

Множинне дублювання даних серед учасників мережі є ще одним недоліком блокчейну. Одним з основних переваг блокчейну було усунення проміжних ланок і впровадження моделі самоврядування. За іронією долі, усунення посередників призвело до створення мережі з надмірним резервуванням. На додаток до цього роль третіх сторін все ще існує через вимоги законодавства [7].

Атака 51 % – це потенційна атака на блокчейн мережу. Якщо атакуючий контролює більше половини обчислювальної потужності мережі, він може генерувати блоки швидше, ніж інші. Володіючи потужністю понад 50%, майнер може скасувати транзакції, заважати всім або деяким транзакціям бути обробленими і перешкоджати включенню в блокчейн блоків від інших майнерів [24].

Атаці 51 % вже піддалася не одна валюта. У 2016 році пул «Команда 51» атакували відразу дві валюти Krypton і Shift, прибуток зловмисників склав 22000 токенів. У травні 2018 року була проведена велика атака на Bitcoin Gold. Невідомий хакер заволодів більшою частиною потужності мережі і тим самим за три дні накопичив 388,000 BTG [25].

Переваги спрямованого ациклічного графа

DAG мережі увібрали в себе всі основні переваги блокчейну і поєднують їх з рядом поліпшень.

Масштабованість. Основною причиною розвитку DAG стала неможливість блокчейну впоратися з великими навантаженнями і завантаженістю мережі. Пропускна здатність систем на основі DAG може досягати 1 млн транзакцій в секунду. Оскільки в DAG немає майнерів, то консенсус досягається шляхом павутини верифікацій.

Немає майнінгу. Відсутність блоків призвело до відсутності майнерів, що у свою чергу, призвело до відсутності високопродуктивних комп'ютерів, що беруть участь в гонці для вирішення математичних задач [26].

Відсутність комісій. Користувачі можуть відправляти транзакції з мінімальними комісіями або зовсім без них.

Швидкість. Блокчейн мережі сповільнюються в міру збільшення бази користувачів і для підтвердження транзакцій потрібно більше часу. Мережі DAG працюють протилежним чином – чим більше вони використовуються, тим швидше працюють. Це дозволяє користувачам здійснювати миттєві транзакції [26].

Опір квантовим атакам. З метою підвищення рівня криптографічної захищеності розробники IOTA запропонували нову хеш-функцію Curl в трійковій системі числення, застосування якої збільшує кількість можливих комбінацій і робить алгоритм більш стійким до атак методом прямого перебору. Однак літом 2017 року Curl довелося замінити функцією Kerl (реалізація SHA-3). Оскільки в первісному варіанті виявили критичну вразливість, що дозволяла підробляти підписи. Для підписання вхідних транзакцій в криптовалюті IOTA застосовують одноразові цифрові підписи Вінтерніца (Winternitz One-time Signature), стійкі до атак з використанням квантових комп'ютерів [27]. А також безпечний і зашифрований обмін даними між двома вузлами забезпечує протокол MAM (англ. Masked Authenticated Messaging).

Порівняння технології блокчейн і спрямованого ациклічного графа

Порівняємо дві парадигми між собою і визначимо, яка з них найкраща. У табл. 1 представлено порівняння блокчейну і DAG.

Слід зазначити, що обидві технології досить схожі і дозволяють створювати децентралізовані системи з високим ступенем безпеки, але за різними принципами. Перш за все, DAG так само, як блокчейн, є розподільним реєстром даних, але на відміну від блокчейну інформація в ньому не записується в суворій спрямованості [28]. Крім того, обидві платформи працюють через систему, засновану на консенсусі, де вузли вирішують, що станеться. Таким чином, тут існує певна подоба демократії в порівнянні з централізованими системами. На жаль, на цьому схожість закінчується [4].

Обговорення результатів порівняльного аналізу технології блокчейн та спрямованого ациклічного графа

У результаті проведених досліджень зроблено наступний висновок. Незважаючи на те, що технологія DAG молода та неперевірена вона вже затьмарила ТБ. З табл. 1 видно, що спрямований граф принципово відрізняється від блокчейну в тому, що стосується структури даних. Як зазначено раніше, блокчейн – це прямолінійний розподілений реєстр, в якому всі дані хешіруются і записуються в блоки в суворій послідовності. Мінус цієї структури в тому, що вона допускає тільки один ланцюжок у всій мережі. Такий алгоритм дій істотно сповільнює перевірку транзакцій, оскільки не дозволяє створювати блоки паралельно. Навпаки, ідея технології DAG заснована на паралельних ланцюжках. Це дозволяє різним типам транзакцій одночасно виконуватися на різних ланцюжках.

Ще одною головною відмінністю DAG є те, що для валідації транзакцій не потрібні майнери. Для того, щоб нова транзакція була підтверджена в мережі DAG, необхідно схвалення двох попередніх транзакцій. Це означає, що транзакція повинна буде гарантувати, що дві з попередніх транзакцій не містять суперечливу інформацію. Кожна транзакція створює для них хеші та включає їх до свого складу. Що стосується блокчейну, то тут майнери підтверджують транзакції і вирішують, які з них увійдуть до нового блоку мережі. Крім того, по мірі збільшення блоків в блокчейні все важче стає вирішити складну математичну задачу та отримати новий блок. Таким чином, майнінг стає більш енергоємним, а отже, дорогим.

З отриманих результатів видно, що DAG можна використовувати практично скрізь, де використовуються інші ТРР. DAG слід застосовувати в сценаріях, які потребують швидких і безкоштовних транзакцій.

Для проведення порівняльного аналізу було обрано три різні системи на основі ТРР: Bitcoin, Ethereum і IOTA. При цьому не розглядалися інші популярні ТРР на основі DAG, зокрема Nxt, Byteball и Nano. При порівнянні не враховувалися нові альтернативні рішення, які спрямовані на усунення недоліків блокчейну (наприклад, Hashgraph).

Таблиця 1 – Порівняння блокчейну і DAG

Критерії	Блокчейн	DAG
Транзакції	Транзакції групуються в блоки і згодом додаються в ланцюжок	Транзакції не групуються разом. Кожна транзакція обробляється від транзакції до транзакції
Консенсус	В даних мережах майнери відповідають за підтвердження транзакцій і додавання нових блоків в блокчейн	Кожна нова транзакція підтверджує дві інші транзакції
Швидкість	Середній час підтвердження транзакції становить близько 10 хв	Середній час підтвердження транзакції становить 30 с
Майнінг	Майнери присутні	Майнери відсутні
Споживання енергії	Оскільки технологія заснована на майнінгу для отримання Proof of Work для кожного блоку транзакцій, системі потрібно високе енергоспоживання для видобутку одного блоку.	Майнінг не застосовується і, отже, значно скорочує кількість споживаної енергії.
Квантовий опір	Ні	Так
Масштабованість	Не масштабується	Масштабується
Комісія за транзакцію	Комісії для транзакцій будь-якої вартості	DAG не включає комісію або зовсім її виключає
Надійність	Групи користувачів можуть контролювати більшу частину потужності в мережі і підвищити ймовірність подвійних витрат.	Структура DAG знижує ймовірність подвійних витрат
Атаки	Атака 51 %. Блокчейн стає вразливим, якщо в руках у одного з учасників виявляється 51 % обчислювальної потужності мережі	Атака 34 %. Теоретична вразливість починається вже на позначці в 34 % на ранній реалізації (це для IOTA)
Мережі, що працюють на платформі	Bitcoin і Ethereum	NXT, IOTA і ByteBall

Висновки

Аналіз архітектури блокчейн показує, що дана технологія визначає єдину гілку, в якій містяться всі транзакції. Натомість структура DAG більше схожа на дерево, де багато ланцюгів переплітаються між собою. Транзакції зберігаються в вузлах, де кожен вузол містить одну транзакцію. На відміну від блокчейну, DAG не вимагає від майнерів підтверджувати справжність кожної транзакції. Дві попередні транзакції підтверджують достовірність подальшої транзакції, що призводить до значно прискореного процесу (транзакції проходять майже миттєво). Крім того, блокчейн має наступні обмеження: енергозатратність, майнінг, обмежена пропускна здатність, комісія за транзакцію. Всі ці обмеження вирішуються за допомогою DAG.

Порівнюючи дві парадигми стає очевидним, що DAG є кращим за ТБ. DAG є більш гнучким і масштабованим, а з часом орграф стає швидшим і потужнішим, тоді як блокчейн стає повільнішим і менш продуктивним. DAG є безкоштовним, вузлам мережі непотрібно платити за перевірку транзакцій. У блокчейні комісія за транзакцію занадто висока, або бракує майренів для підтвердження транзакцій. В результаті це призводить то того, що вузлам треба платити високі комісії за транзакцію, щоб уникнути затримки підтвердження.

Список літератури

1. Andina M. *Explained: The technology behind bitcoin and blockchain*. URL: https://www.swissinfo.ch/eng/beyond-the-hype_explained-the-technology-behind-bitcoin-and-blockchain/44885296 (дата звернення: 15.10.2019).
2. Momot T., Tumietto D., Teslenko R. Blockchain technology as an innovative instrument of digital economy: Technology essence, world experience and implementation problems. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2018. Т. 4, № 6. С. 137–145. doi: 10.30837/2522-9818.2018.6.137
3. Ray S. *The difference between blockchains & distributed ledger technology*. URL: https://towardsdatascience.com/the-difference-between-blockchains-distributed-ledger-technology-42715a0fa92 (дата звернення: 22.10.2019).
4. Anwar H. *The ultimate comparison of different types of distributed ledgers: Blockchain vs hashgraph vs DAG vs holochain*. URL: https://101blockchains.com/blockchain-vs-hashgraph-vs-dag-vs-holochain/ (дата звернення: 22.10.2019).
5. World Bank Group. *Distributed ledger technology (DLT) and blockchain*. URL: https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/29053/WP-PUBLIC-Distributed-Ledger-Technology-and-Blockchain-Fintech-Notes.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата звернення: 03.11.2019).
6. Bank of England. *The economics of distributed ledger technology for securities settlement*. URL: https://www.bankofengland.co.uk/-/media/boe/files/working-paper/2017/the-economics-of-distributed-ledger-technology-for-securities-settlement.pdf?la=en=17895E1C1FEC86D37E12E4BE63BA9D9741577FE (дата звернення: 05.11.2019).
7. Pervez H., Muneeb M., Irfan M. U., Haq I. A Comparative Analysis of DAG-Based Blockchain Architecture. *2018 12th International Conference on Open Source Systems and Technologies (ICOSST)*. IEEE, 2018. С. 27–34.
8. Bencic F. M., Zarko I. P. Distributed ledger technology: Blockchain compared to directed acyclic graph. *2018 IEEE 38th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*. IEEE, 2018. С. 1569-1570.
9. Кричевська Т. О. Технологія розподіленого реєстру: теоретико-інституційні засади, потенціал, фактичні досягнення та соціально-економічне значення. *Ефективна економіка*. 2018. Т. 11. doi: 10.32702/2307-2105-2018.11.84
10. Tijan E., Aksentijevic S., Ivanic K., Jardas M. Blockchain technology implementation in logistics. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2019. Т. 11, № 4. С. 1185. doi: 10.3390/su11041185

11. Perboli G., Musso S., Rosano M. Blockchain in logistics and supply chain: A lean approach for designing real-world use cases. *IEEE Access*. 2018. Т. 6. С. 62018–62028. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2875782
12. Khezr S., Moniruzzaman M., Yassine A. Blockchain technology in healthcare: A comprehensive review and directions for future research. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2019. Т. 9, № 9. С. 1736. doi: 10.3390/app9091736
13. Agbo CC., Mahmoud QH., Eklund JM. Blockchain technology in healthcare: A systematic review. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2019. Т. 7, № 2. С. 56. doi: https://doi.org/10.3390/healthcare7020056
14. Alammary A., Alhazmi S., Almasri M., Gillani S. Blockchain-Based Applications in Education: A Systematic Review. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2019. Т. 9, № 12. С. 2400. doi: 10.3390/app9122400
15. Свон М. *Блокчейн: Схема новой экономики*. Москва: Олимп-Бизнес, 2017. 240 с.
16. Башир И. *Блокчейн: архитектура, криптовалюты, инструменты разработки, смарт-контракты.* Москва: ДМК Пресс, 2019. С. 538.
17. Анисимов М. *Что такое Блокчейн?*. URL: https://bytwork.com/articles/chto-takoe-blokcheyn (дата звернення: 20.11.2019).
18. Ferraro P., King C., Shorten R. Distributed Ledger Technology for Smart Cities, the Sharing Economy, and Social Compliance. *IEEE Access*. 2018. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2876766
19. Табернакулов А., Койфманн Я. *Блокчейн на практике.* Москва: Альпина Паблишер, 2019. 264 с.
20. Valley S. *Gas – разбираемся с комиссиями в системе Ethereum.* URL: https://medium.com/@smartplanetchannel/gas-разбираемся-с-комиссиями-в-системе-ethereum-fae388b7cdf (дата звернення: 22.11.2019).
21. Rieth Y. *Преимущества и недостатки технологии блокчейн.* URL: https://magazine.decenter.org/ru/1-blokchein-i-kriptovalyuty/2-preimushestva-i-nedostatki-tekhnologii-blokchein (дата звернення: 25.11.2019).
22. Binance Academy. *Blockchain advantages and disadvantages.* URL: https://www.binance.vision/blockchain/positives-and-negatives-of-blockchain (дата звернення: 25.10.2019).
23. Tirone J. *Green-Power Bitcoin Miner Weighs IPO and Pleads for Regulation.* URL: https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-01-12/green-power-bitcoin-miner-weighs-ipo-and-pleads-for-regulation (дата звернення: 28.10.2019).
24. Прасти Н. *Блокчейн. Разработка приложений.* Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2018. 256 с.
25. PayKassa. *Что такое атака 51 %?*. URL: https://blog.paykassa.pro/chto-takoe-ataka-51/ (дата звернення: 7.12.2019).
26. Advanced Blockchain AG. *DAG based DLT Network.* URL: https://www.advancedblockchain.com/docs/DAG_ADVANCED_BLOCKCHAIN_AG.pdf (дата звернення: 10.12.2019).
27. Сачов С.О., Короткий Є.В. Апаратний прискорювач операції доказу виконаної роботи в криптовалюті IOTA. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*. 2019. Т. 24, № 1. С. 42–52. doi: 10.20535/2523-4455.2019.24.1.167007
28. Prosto Coin. *Что такое направленный ациклический граф (DAG) в криптовалюте.* URL: https://prostocoin.com/blog/dag (дата звернення: 10.12.2019).

References (transliterated)

1. Andina M. *Explained: The technology behind bitcoin and blockchain.* Available at: https://www.swissinfo.ch/eng/beyond-the-hype_explained-the-technology-behind-bitcoin-and-blockchain/44885296 (accessed: 15.10.2019).
2. Momot T., Tumietto D., Teslenko R. Blockchain technology as an innovative instrument of digital economy: Technology essence, world experience and implementation problems. *Suchasnyy stan naukovykh doslidzhen' ta tekhnolohiy v promyslovosti.* 2018, vol. 4, no. 6, pp. 137–145. doi: 10.30837/2522-9818.2018.6.137
3. Ray S. *The difference between blockchains & distributed ledger technology*. Available at: https://towardsdatascience.com/the-difference-between-blockchains-distributed-ledger-technology-42715a0fa92 (accessed: 22.10.2019).
4. Anwar H. *The ultimate comparison of different types of distributed ledgers: Blockchain vs hashgraph vs DAG vs holochain.* Available at: https://101blockchains.com/blockchain-vs-hashgraph-vs-dag-vs-holochain/ (accessed: 22.10.2019).
5. World Bank Group. *Distributed ledger technology (DLT) and blockchain.* Available at: https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/29053/WP-PUBLIC-Distributed-Ledger-Technology-and-Blockchain-Fintech-Notes.pdf?sequence=1&isAllowed=y (accessed: 03.11.2019).
6. Bank of England. *The economics of distributed ledger technology for securities settlement.* Available at: https://www.bankofengland.co.uk/-/media/boe/files/working-paper/2017/the-economics-of-distributed-ledger-technology-for-securities-settlement.pdf?la=en=17895E1C1FEC86D37E12E4BE63BA9D9741577FE (accessed: 05.11.2019).
7. Pervez H., Muneeb M., Irfan M. U., Haq I. A Comparative Analysis of DAG-Based Blockchain Architecture. *2018 12th International Conference on Open Source Systems and Technologies (ICOSST)*. IEEE Publ., 2018, pp. 27–34.
8. Bencic F.M., Zarko I. P. Distributed ledger technology: Blockchain compared to directed acyclic graph. *2018 IEEE 38th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*. IEEE Publ., 2018, pp. 1569-1570.
9. Krychevska T. O. Tekhnolohiya rozpodilenoho reyestru: teoretyko-instytutsiyni zasady, potentsial, faktychni dosyahnennya ta sotsial'no-ekonomichne znachennya [Distributed ledger technology: theoretical and institutional foundations, potential, actual achievements, and socio-economic role]. *Efektyvna ekonomika*. 2018, vol. 11. doi: 10.32702/2307-2105-2018.11.84
10. Tijan E., Aksentijevic S., Ivanic K., Jardas M. Blockchain technology implementation in logistics. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2019, vol. 11, no 4, pp. 1185. doi: 10.3390/su11041185
11. Perboli G., Musso S., Rosano M. Blockchain in logistics and supply chain: A lean approach for designing real-world use cases. *IEEE Access*. 2018, vol. 6, pp. 62018–62028. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2875782
12. Khezr S., Moniruzzaman M., Yassine A. Blockchain technology in healthcare: A comprehensive review and directions for future research. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2019, vol. 9, no 9, pp. 1736. doi: 10.3390/app9091736
13. Agbo CC., Mahmoud QH., Eklund JM. Blockchain technology in healthcare: A systematic review. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2019, vol. 7, no 2, pp. 56. doi: https://doi.org/10.3390/healthcare7020056
14. Alammary A., Alhazmi S., Almasri M., Gillani S. Blockchain-Based Applications in Education: A Systematic Review. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2019, vol. 9, no 12, pp. 2400. doi: 10.3390/app9122400
15. Swan M. *Blockchain: Blueprint for a new economy.* Sebastopol, O'Reilly Media, 2015. 152 p. (Russ. ed.: Svon M. *Blokcheyn: Skhema novoy ekonomiki*. Moscow, Olimp-biznes Publ., 2017. 240 p.).
16. Bashir I. *Mastering Blockchain: Distributed ledger technology, decentralization, and smart contracts explained.* 2nd Revised ed. Birmingham, Packt Publishing Ltd, 2018. 656 p. (Russ. ed.: Bashir I. *Blokcheyn: arkhitektura, kriptovalyuty, instrumenty razrabotki, smart-kontrakty*. Moscow, DMK Press Publ., 2019. 538 p.).
17. Anisimov M. *Chto takoe Blokcheyn?* [What is blockchain?]. Available at: https://bytwork.com/articles/chto-takoe-blokcheyn (accessed: 20.11.2019).
18. Ferraro P., King C., Shorten R. Distributed Ledger Technology for Smart Cities, the Sharing Economy, and Social Compliance. *IEEE Access*. 2018. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2876766
19. Tabernakulov A., Koyfmann Ya. *Blokcheyn na praktike* [Blockchain in practice]. Moscow, Al'pina Pablisher Publ., 2019. 264 p.
20. Valley S. *Gas – razbyraemsya s komyssyyamy v systeme Ethereum* [Gas – deal with commissions in the Ethereum system]. Available at: https://medium.com/@smartplanetchannel/gas-разбираемся-с-комиссиями-в-системе-ethereum-fae388b7cdf (accessed: 22.11.2019).
21. Rieth Y. *Preimushchestva i nedostatki tekhnologii blokcheyn* [Advantages and disadvantages of blockchain technology]. Available at: https://magazine.decenter.org/ru/1-blokchein-i-kriptovalyuty/2-preimushestva-i-nedostatki-tekhnologii-blokchein (accessed: 25.11.2019).

22. Binance Academy. *Blockchain advantages and disadvantages*. Available at: https://www.binance.vision/blockchain/positives-and-negatives-of-blockchain (accessed: 25.10.2019).
23. Tirone J. *Green-Power Bitcoin Miner Weighs IPO and Pleads for Regulation*. Available at: https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-01-12/green-power-bitcoin-miner-weighs-ipo-and-pleads-for-regulation (accessed: 28.10.2019).
24. Prusty N. *Building blockchain projects*. Birmingham, Packt Publishing Ltd, 2017. 268 p. (Russ. ed.: Prasti N. *Blokcheyn. Razrabotka prilozheniy*. St.Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2018. 256 p.).
25. PayKassa. *Chto takoe ataka 51 %?* [What is a 51% attack?]. Available at: https://blog.paykassa.pro/chto-takoe-ataka-51/ (accessed: 7.12.2019).
26. Advanced Blockchain AG. *DAG based DLT Network*. Available at: https://www.advancedblockchain.com/docs/DAG_ADVANCED_BLOCKCHAIN_AG.pdf (accessed: 10.12.2019).
27. Sachov S. O., Korotkyy Ye. V. Aparatnyy pryskoryuvach operatsiyi dokazu vykonanoyi roboty v kryptovalyuti IOTA [Hardware accelerator for Proof-Of-Work operation in IOTA cryptocurrency]. *Mikrosystemy, Elektronika ta Akustyka*. 2019, vol. 24, no 1. pp. 42–52. doi: 10.20535/2523-4455.2019.24.1.167007
28. Prosto Coin. *Chto takoe napravlennyy atsiklicheskiy graf (DAG) v kriptovalyute* [What is a directed acyclic graph (DAG) in cryptocurrency]. Available at: https://prostocoin.com/blog/dag (accessed: 10.12.2019).

Надійшла (received) 07.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ключка Ярослав Олександрович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9702-6837; e-mail: y.kliuchka.kpi@gmail.com

Шматко Олександр Віталійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2426-900X; e-mail: asu.spios@gmail.com

Ключка Ярослав Александрович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9702-6837; e-mail: y.kliuchka.kpi@gmail.com

Шматко Александр Витальевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2426-900X; e-mail: asu.spios@gmail.com

Kliuchka Yaroslav Oleksandrovych – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», postgraduate student; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9702-6837; e-mail: y.kliuchka.kpi@gmail.com

Shmatko Olexander Vitaliyovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University «Kharkov Polytechnical Institute», Associate Professor at the Department of Software Engineering and Management Information Technologies department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2426-900X; e-mail: asu.spios@gmail.com

UDC 004.02 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.19**

I. Y. MALIK, V. Y. VOLOVSHCHYKOV, V. F. SHAPO, M. A. GRINCHENKO

TECHNOLOGY OF IDENTIFYING ANTIPATTERNS IN ANDROID PROJECTS WRITTEN IN KOTLIN LANGUAGE

The problem of the lack of instruments for identifying the characteristics of low-quality code in Android projects that are written in the Kotlin language is determined. A review of modern approaches for identifying antipatterns in program code is accomplished. The analysis of the methods used to find problems with code in Android projects is performed. DECOR and Paprika approaches are considered. Conclusions are drawn about the importance of finding design flaws in program code for the mobile software development and its further support. An antipatterns identification approach for Kotlin language program code in Android projects is proposed. An algorithm for identifying low-quality Kotlin code is presented. The technology for detecting poor quality code characteristics consists of four stages: collecting metrics about an analyzed software system, building a quality model, converting a quality model into a graph representation, and identifying predefined antipatterns. The collection of metrics, including the search for both Android-specific and object-oriented metrics of Chidamber and Kamerer, is proposed to be implemented through parsing source code and converting it into an abstract syntax tree using the KASTree library. The implementation of KASTree library usage is offered through the Adapter design pattern. The construction of a quality model is implemented using the Paprika tool, supplemented by a number of introduced metrics. Conversion of quality model exactly into graph representation is used to identify antipatterns in order to ensure the speed and quality of complex queries execution for identifying antipatterns. Antipatterns identification using database queries is based on various template rules, including the Catolino rules. Different features of applying the Cypher query language to a graph database are used to represent the rules in form of queries. Results of the work can be used in development of software for poor quality code identification in mobile applications written in Kotlin language, as well as in studies of mobile development antipatterns for this language.

Keywords: antipattern, identification, graph model, low-quality code, Kotlin, Android, Adapter pattern

І. Ю. МАЛІК, В. Ю. ВОЛОВЩИКОВ, В Ф. ШАПО, М. А. ГРИНЧЕНКО

ТЕХНОЛОГІЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ АНТИПАТЕРНІВ В КОДІ ANDROID ПРОЕКТІВ МОВОЮ KOTLIN

Визначена проблема відсутності програмного забезпечення для ідентифікації характеристик низькоякісного коду в проектах Android, що розроблені з використанням мови програмування Kotlin. Проведено огляд сучасних підходів до виявлення анти-шаблонів в програмному коді. Виконано аналіз методів, що використовуються для знаходження проблем з кодом для Android проектів. Розглянуто відомі підходи до ідентифікації: DECOR та Paprika. Зроблено висновки про важливість знаходження недоліків у програмному коді для розробки мобільного програмного забезпечення та його майбутнього обслуговування. Запропоновано підхід до ідентифікації антипатернів у програмному коді Kotlin для Android проектів. Представлено алгоритм ідентифікації неякісного коду. Технологія визначення характеристик неякісного коду включає чотири етапи: збір метрик про програмну систему, що аналізується, побудова моделі якості, конвертація моделі якості в графове представлення та ідентифікація наперед визначених антипатернів. Збір метрик, що включає пошук як Android-специфічних, так і об'єктно-орієнтованих метрик Чидамбера та Камерера, пропонується реалізувати через синтаксичний аналіз вихідного коду та його конвертацію в абстрактне синтаксичне дерево з використанням бібліотеки KASTree. Впровадження бібліотеки KASTree пропонується через шаблон проектування Адаптер. Побудова моделі якості реалізується засобами інструменту Paprika, що доповнено низкою введених метрик. З метою забезпечення швидкості та якості виконання складних запитів для ідентифікації антипатернів використовується конвертація моделі якості саме в графове представлення. Безпосередньо ідентифікація антишаблонів за допомогою запитів використовує в якості основи різноманітні шаблонні правила, у тому числі правила Католіно. Для представлення правил у вигляді запитів використовуються можливості застосування мови запитів Cypher до графової бази даних. Результати роботи можуть бути використані при розробці програмного забезпечення для ідентифікації неякісного коду в мобільних застосунках, що написані мовою Kotlin, а також при дослідженні антипатернів в мобільній розробці з використанням даної мови.

Ключові слова: антипатерн, ідентифікація, графова модель, неякісний код, Kotlin, Android, патерн Адаптер

И. Ю. МАЛИК, В. Ю. ВОЛОВЩИКОВ, В. Ф. ШАПО, М. А. ГРИНЧЕНКО

ТЕХНОЛОГИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ АНТИПАТТЕРНОВ В КОДЕ ANDROID ПРОЕКТОВ НА ЯЗЫКЕ KOTLIN

Определена проблема отсутствия средств идентификации характеристик некачественного кода в проектах Android, которые написанные на языке Kotlin. Проведен обзор современных подходов к выявлению анти-шаблонов в программном коде. Выполнен анализ методов, используемых для нахождения проблем с кодом в Android проектах. Рассмотрены известные подходы по обнаружению антипаттернов в коде: DECOR и Paprika. Сделаны выводы о важности нахождения недостатков в программном коде для разработки мобильного программного обеспечения и его будущей поддержки. Предложен подход к идентификации антипатернов в программном коде Kotlin для Android-проектов. Представлен алгоритм идентификации некачественного кода. Технология определения характеристик некачественного кода включает четыре этапа: сбор метрик об анализируемой программной системе, построение модели качества, конвертация модели качества в графовое представление и идентификация заранее определенных антипаттернов. Сбор метрик, включающий поиск как Android-специфических, так и объектно-ориентированных метрик Чидамбера и Камерера, предлагается реализовывать через синтаксический анализ исходного кода и конвертацию его в абстрактное синтаксическое дерево с использованием библиотеки KASTree. Внедрение библиотеки KASTree предлагается через шаблон проектирования Адаптер. Построение модели качества реализуется средствами инструмента Paprika, дополненного рядом введенных метрик. С целью обеспечения скорости и качества выполнения сложных запросов для идентификации антипаттернов используется конвертация модели качества именно в графовое представление. Непосредственно идентификация антипаттернов с помощью запросов использует в качестве основы различные шаблонные правила, в том числе правила Католино. Для представления правил в виде запросов используются возможности применения языка Cypher к графовой базе данных. Результаты работы могут быть использованы при разработке программного обеспечения для идентификации некачественного кода в мобильных приложениях, написанных языком Kotlin, а также при исследованиях антипатернов в мобильной разработке с использованием указанного языка.

Ключевые слова: антипаттерн, идентификация, графовая модель, некачественный код, Kotlin, Android, паттерн Адаптер

© I. Y. Malik, V. Y. Volovshchykov, V. F. Shapo, M. A. Grinchenko, 2020

Introduction. The field of information systems development has existed for a long time. There are currently projects that have been supported for over 10 years and systems are being developed that will be maintained for a long time to come. In such circumstances, it is important to maintain the quality of the software product consistently. One of the main characteristics of quality software (SW) is the quality of the source code. Its readability, ease of understanding, simplicity of support and refactoring play an important role in supporting the project [1]. Therefore, writing quality code is an important task of software engineering (SE).

Poor quality code characteristics are programming patterns that indicate potential source code issues [2]. These characteristics are different from software errors because they do not affect the correctness of the application. However, these patterns provoke the creation of a system that is more difficult to develop and maintain, which can make the software more vulnerable to errors.

At present, most studies related to the characteristics of low-quality code focus on desktop and web-based applications. However, nowadays, mobile platforms are becoming more popular [3]. Therefore, it is an important task to investigate the characteristics of poor quality code specific to mobile development. It follows that one of the most important tasks is to develop a detector that can identify the flaws in the source code of mobile projects.

Analysis of literature and major achievements. With the advent of mobile applications as new software systems, many authors have begun to study mobile-specific code problems. Reimann [4] proposed a directory of 30 high-quality factors of poor quality code for Android. These factors cover various aspects such as software implementation, user interface, and database usage. After these, characteristics were identified and described by Reimann. Scientists began to propose tools and approaches for their detection [5, 6, 7].

Much of the research on code defects in Android applications focuses on examining the effect of basic factors of problematic code [2]. For example, Linarez-Vasquez [8] used the DECOR tool [9] to detect object-oriented antipatterns in mobile applications developed with J2ME. DECOR, in turn, is based on peer inspections, DSL, and automatic generation of identification algorithms.

Rasool [10] examined the existence of traditional poor-quality code criteria [2] in Android applications written in Java to determine whether they are more common in the mainstream classes. Mainstream classes are classes in the Android project that are inherited from Android SDK classes, such as Activity, Fragments, Services. The author states that the basic classes tend to suffer from God class, Long method and Switch operator because of their character, since they perform most of the functionality of the software. The author also found that a Long list of methods is less likely to appear in basic classes because their methods are inherited from classes defined in the Android SDK.

Hecht [5] developed a tool to detect poor-quality Paprika code for 8 features for the Java programming language. He created his own approach using a graph model. The author searched for defects in 15 popular Android applications, including Facebook, Skype and Twitter. The author claims that traditional code smells are as common in Android as non-Android applications.

Mannan [11] conducted a large-scale empirical study to compare the prevalence and impact of antipatterns on mobile and desktop applications. The author found that while the density of code problems is the same in both mobile and desktop systems, some of them are more common in mobile applications. For example, Data class is more common in mobile applications, while duplication of code is more inherent in desktop systems.

Mohammed Ilyas Azeem in his work [12] analyzed machine learning techniques that were investigated to identify low-quality code. He concluded that most existing studies use decision trees or the support vector method as machine learning algorithms. However, the problem of creating the optimal configuration has not been properly solved.

Problems of identifying low-quality code in Android projects. Analysis [5–9] found a large number of studies devoted only to the Java programming language. Java remains one of the most popular programming languages in the world and for Android projects in particular. However, nowadays, Kotlin programming language is also becoming popular [13], which is being developed rapidly and is supported by many developers all over the world. Kotlin is included in the list of officially supported languages for developing Android applications. Since May 7, 2019 it is the recommended language for Android application development. However, no tools were found that could detect low-quality code written on Kotlin. There is still a problem with the lack of methods, technologies or algorithms for detecting poor quality code characteristics for projects created using Kotlin. The main cause of this problem can be considered the relative youth of the language. The stable version was released only 4 years ago. Research into identifying code issues for Kotlin is very important.

Another problem is the presence of non-identifiable characteristics. Since the beginning of antipatterns studies and their classification, there have been various attempts to identify the characteristics available. However, a review [5, 6, 8, 10] confirmed that developed applications can only detect some of the code issues described. Fig. 1 shows how often different antipatterns have been studied in the literature. From fig. 1 it follows that some characteristics are studied more frequently, while there are still poor quality code factors for which no relevant studies have been conducted. Of all the characteristics of the bad quality code identified by Fowler [2], there are still those that are not determined by any identification technique. There are more than thirteen different techniques in the literature regarding 21 code defects, and 16 methods have been developed for the God class only. However, none of them shows the above mentioned defects. It can be concluded that not all code flaws are currently identifiable.

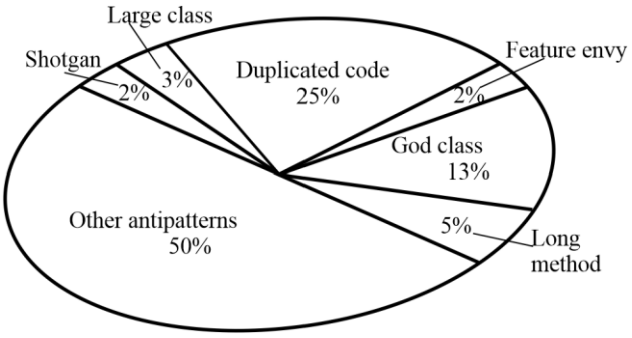


Fig. 1 Study frequency of individual characteristics

Analysis of existing methods. The literature [5, 9] describes two main approaches to identifying the characteristics of low-quality code in Android applications. The first one is used in software called DECOR. Its main idea is to use the expertise knowledge to build the classification and taxonomy that generates the identification algorithms. Another method was developed for Paprika SP. It is based on the metrics of the application being analyzed and the construction of quality and graph models. Based on the latter, source code defects are detected.

Fig. 2 illustrates a common algorithm for identifying antipatterns in code. A key element is the identification approach, which varies by tool. However, it receives input on the characteristics of poor-quality code and software metrics generated from source or compiled code.

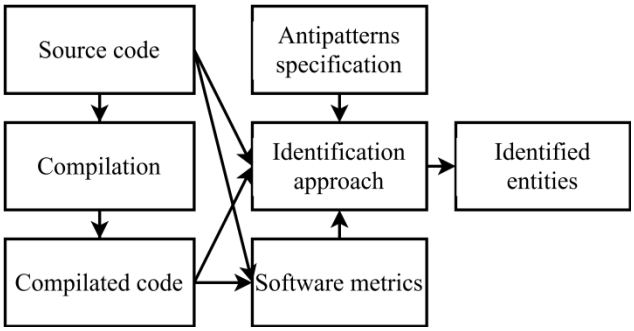


Fig. 2 General identification algorithm

The antipattern detection technology in DECOR uses a four-step algorithm. At the first step, the experts analyze the subject domain and identify the key concepts on the basis of which the classification and taxonomy of all characteristics of poor quality code are made. The second step is the specification of factors using domain-specific language (DSL). The key concepts are formalized in the form of rule cards, where a card is a set of rules which contains characteristics that describe a particular antipattern. DSL allows to determine the links, properties, and internal structure of the antipattern using metrics. The rule cards then automatically generate an algorithms for issue identifying with code using DSL and the source code parser. In the last step, the generated algorithms are automatically applied to system models and identify suspicious classes.

DECOR is designed with features of Java language, its syntax and corresponding code-writing convention. Therefore, in the study [9], all metrics are calculated according to this programming language. In addition, the vocabulary and taxonomy were developed for only four antipatterns. This means that DECOR can only identify them. The disadvantage of this approach is a great dependence on peer inspections. The first two steps of the algorithm are not automated, and adding a new antipattern for identification will be time-consuming and will require experts.

The approach used in the Paprika tool contains a three-step algorithm. The first step is to collect metrics. Input is one APK files and related metadata. Output is a Paprika quality model that includes entities, metrics, and properties. At this step generates a mobile app model and removes quality metrics from the input artifact. Paprika builds the model based on 6 entities. 17 properties describe entities and attach to them as attributes. Properties and entities are united by connections. Paprika also pulls metrics for each entity. There are currently 34 metrics available. The method uses 2 types of metrics: object-oriented and Android-specific. Unlike properties, metrics require the calculation or processing of byte-code. The quality model is built using the described parameters. The second step is the conversion of the quality model into a graph model. The input is a model received at the previous step. The output is a graph model stored in the database. Because graph databases are independent of the rigid scheme, the graph model is almost the same as the first step model. All entities are represented as vertices of a graph. Attributes and metrics are properties of vertices. The connections between the entities are represented by unidirectional edges. The last step is the identification of antipatterns. Input is a graph database containing a quality model. Output is vertices, and therefore entities containing antipatterns. Once the model is downloaded and indexed by the graphical database, you can use the database query language to identify common characteristics of poor-quality code.

Because Paprika analyzes byte-code, this means that this tool can only analyze Java-written applications. In addition, the byte-code often fails to get accurate metric estimates. This was stated by the author himself in his research [5].

Formulation of the problem. An analysis of works [5–10] designates two major problems with identifying poor-quality code in Android projects: the lack of methods and tools for Kotlin and the presence of unexplored programming antipatterns. Kotlin [13] has been identified by Google as being a recommended development tool for Android, which is rapidly developing and gaining popularity. Considering also that there are only four poor-quality code unexplored factors, it can be concluded that the first problem is more critical. In addition, it should be noted that more than 8% [13] of all developers use Kotlin all the time. Thus, it can be said that the topic of research of the identification of problem code for Android projects written in Kotlin is relevant.

According to the analysis [5–9], two main methods for identifying poor-quality code were determined. Because the DECOR approach is not fully automated, the authors will not rely on it for research. The approach used in Paprika is more promising, as the author revealed not

only general characteristics, but also Android specific ones. However, the results of the metric calculation, and therefore the identifications will be more accurate when analyzing the source code. It will also expand the list of used metrics. This approach will increase the number of identifiable antipatterns. Therefore, it is proposed in the future to improve the Paprika technique by analyzing the source code and to use it to identify Kotlin code flaws.

Thus, the purpose of the work is to investigate and improve the method of identifying poor-quality code for Android projects written in Kotlin.

Low-quality code identification technology. Identification technology developed by the authors builds on four-step approach. Generalized scheme of it is shown in fig. 3. First step includes syntax analysis of project source code. In contrast to Paprika [5], where byte code is analyzed, it was decided to work with source code. This has the following advantages: elimination if information loss, higher accuracy of obtained results, ready-made source code metrics can be used, original names of components are preserved. In addition, byte code is stored in archives, which imposes additional restrictions on operation with system. Source data can be both a link to a project directory and a link to a web hosting service where project is stored (GitHub, Gitlab, Bitbucket etc.). It is suggested to use the KASTree library for syntax analysis. It allows to present the source code as an abstract syntax tree (AST). On the next stage quality model is constructed based on the obtained AST. The syntax tree provides information about classes, methods, variables and relationships between them. Unlike the Paprika quality model this approach also includes object-oriented Chidamber and Kemerer metrics [14]. In the third step after building quality model, it is converted for saving into graph DB. On the last stage identification is performed by calling prepared queries to DB. Queries are needed for searching antipatterns. After that, a report is created listing found code flaws and their location. We briefly describe content of each of the steps in the next sections.

Syntax analysis is a process of converting source code into structured representation. It is needed for building an AST, which can help quickly get needed metrics for generating the quality model. AST is a tree representation of the abstract syntactic structure of source code written in a programming language.

AST is a tree data structure which is a finite set T with the following properties:

- There is only one root T of the tree – project directory;
- Other nodes T_i are syntactic constructions found in the source code;
- All non-root nodes are distributed among disjoint sets and each set is a subtree;

$$T = \bigcup_{i=1}^{m} T_i \,, \bigcap_{i=1}^{m} T_i = \emptyset,$$

where m – number of syntax constructions.

AST can be obtained from a Kotlin project using KASTree library. However, the result of this tool is a syntax constructions list that are not a unified data format.

It is suggested to use Adapter design pattern to provide flexibility and extensibility of the system, which is shown in fig. 4. It converts KASTree library output to a common JSON data format. In case of changing syntax parsing instrument it is not needed to change logic of using AST on the next stage.

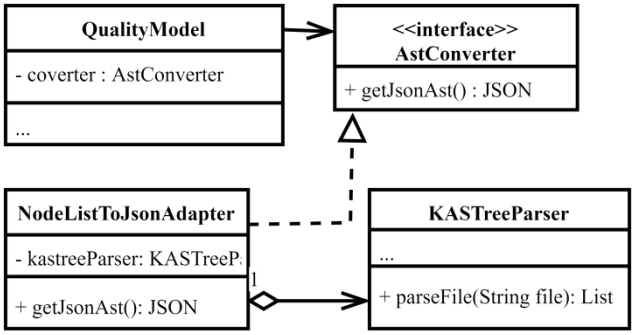


Fig. 4. Adapter design pattern for converting AST

Quality model generation. This model is based on the quality model which used in Paprika instrument [5]. It includes 6 entities: Package, Class, Method, Attribute, Variable and Argument. Each entity is described by attributes, such as full name, access modifier, type and others. The model provides 7 types of relationships between entities: Package Has Class, Class Has Method, Class Has Attribute, Method Has Argument, Inherits, Calls, Uses. Relationships exist between two determined types of entities. For example, relation Inherits can exists only between two entities of type Class. In addition to attributes entities has source code metrics. Model provides 34 metrics. They are dived into object-oriented (OO) and Android-specific metrics. OO metrics consists of simple

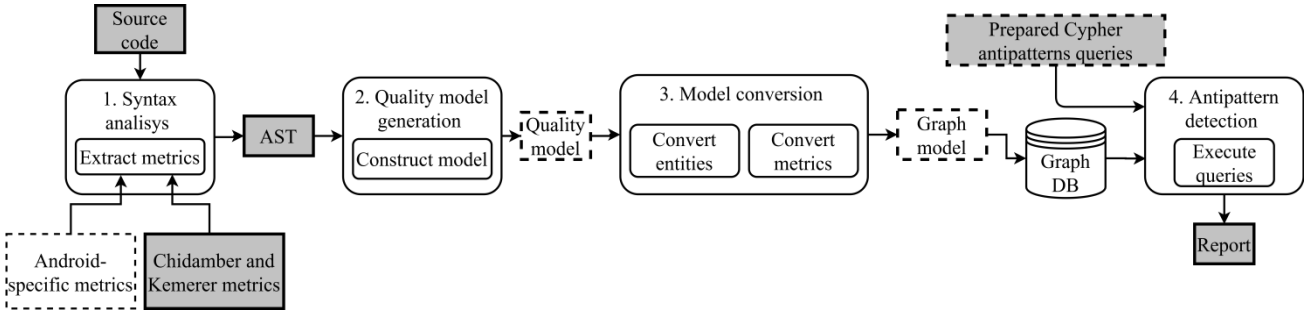


Fig. 3. Low-quality code identification technology for Android projects written in Kotlin

and computational values. Simple measures can be obtained directly from the AST, e. g. number of methods in a class, number of parameters in a method and so on. On the other hand, computing metrics requires additional calculations.

Authors propose to supplement this data with Chidamber and Kemerer metrics. Their usage expands the range of code flaws that can be identified and improves the accuracy of the results. We briefly describe these metrics.

Weighted Methods per Class (WMC). Consider class C with set of methods $m_1,m_2,\dots m_n$, which are defined in this class. Let $c_1,c_2,\dots c_n$ cyclomatic complexity of methods. Then:

$$WMC = \sum_{i=1}^{n} c_i .$$

Cyclomatic complexity is computed using the control flow graph of the program: the nodes of the graph correspond to indivisible groups of commands of a program, and the directed edge connects two nodes if the second command might be executed immediately after the first command. Then:

$$c_i = E_i - N_i + 2, i \in \overline{1,n},$$

where E_i – number of edges in graph for i-th method;

N_i – number of nodes in graph for i-th method.

Depth of Inheritance (DIT). This metric is used to determine the location of a class in the inheritance hierarchy. DIT shows how many class ancestors can potentially affect the class. DIT is defined as a maximum number of ancestral classes per class. It is needed recursively bypass the inheritance tree before reaching the first ancestor class to find this metric. The number of attended classes is DIT.

Coupling Between Objects (CBO) for a class is a count of the number of other classes to which it is coupled. Coupling between two classes is said to occur when one class uses methods or variables of another class. COB is measured by counting the number of distinct non-inheritance related class hierarchies on which a class depends. Let class C with set of methods $m_1,m_2,\dots m_n$ and set of variables $p_1,p_2,\dots p_k$, which are used in this class. Herewith $m_i \notin C, p_j \notin C, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,k}$. Then:

$$CBO = \sum_{i=1}^{n} m_i + \sum_{j=1}^{k} p_j .$$

Response for a Class (RFC) is the count of the set of all methods that can be invoked in response to a message to an object of the class or by some method in the class. This includes all methods accessible within the class hierarchy. RFC is defined as follows:

$$RFC = \{M\} \bigcup_i \{R_i\},$$

where $\{R_i\}$ – set of methods called by i–th method;

$\{M\}$ – set of methods, which belong to class.

Lack of Cohesion in Method (LCOM) measures the extent to which methods reference the classes instance data. Consider a class C with set of methods $m_1,m_2,\dots m_n$. Let $\{I_j\}$ is set of instance variables used by method m_i. There are n such sets $\{I_1,I_2,\dots,I_n\}$. Let $P = \{(I_i,I_j | I_i \cap I_j = \emptyset)\}$, and $Q = \{(I_i,I_j | I_i \cap I_j \neq \emptyset)\}$. If all n sets are empty then let P also is empty. Then:

$$LCOM = \begin{cases} |P| - |Q|, |P| > |Q|, \\ 0, |P| \leq |Q|. \end{cases}$$

Catolino described [15] rules for determining code flaws using described metrics. As shown below, it is possible to identify code smells by converting these rules into database queries.

Transformation into a graph representation. Model must be presented as a graph for convenient and efficient operation of it. If entities of the quality model are considered as vertices of the graph, relationships between entities as edges, and attributes and entity metrics as properties of vertices, then the quality model can be converted to graph form. This graph is stored in memory using a graph DB. This solution is flexible and efficient, because such approach of data storage does not depend on a rigid scheme. Thereby converted model (fig. 4) is the same as that described in previous section. In addition, graph repositories show high performance with datasets up to 2^{35} nodes and relationships. This allows to identify antipatterns even on large systems.

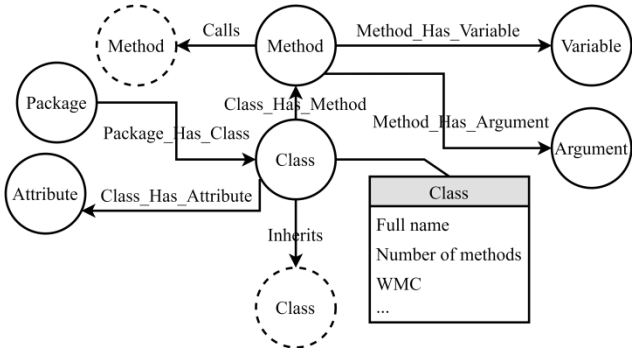


Fig. 4. Schematic representation of a graph model

Antipatterns search. It is suggested to identify code smells based on the model stored in DB. Information about the structural parts of the code which implement antipatterns can be obtained by querying graph DB. A report is built based on this information. Let show searching code flaws on two widespread antipatterns: God Class as object-oriented and Internal getters and setters as Android specific.

God class is a class that contains a large number of fields and methods. It is responsible for different logic, its attributes are related to different processes, which implies strong connection with other classes. Such classes are difficult to maintain and increase the complexity of software modification. Author [15] proposes to use metrics such as WMC, LCOM, number of methods (NM) and number of fields (NF) for identification God Class cases. If for any class C LCOM > 15 and WMC > 9 or NM > 12 and NF > 8, then it is considered as God Class. The graph

DB query in Cypher notation for identification such antipatterns is shown in fig. 5.

```
MATCH (c1:Class)
WHERE
    c1.lack_of_cohesion_in_methods > 15
    AND c1.weighted_methods_per_class > 9
    OR c1.number_of_methods > 12
    AND c1.number_of_attributes > 8
RETURN c1
```

Fig. 5. Cypher query to search for God class

In Android, class fields should be available directly for performance reasons. Usage of internal getters and setters turns into a virtual call, making the operation three times slower than direct access. Internal getters and setters can be identified using the graph model. Query for this antipattern is shown in fig. 6. This query looks for two methods from one class, when one calls the other, designated as a getter or setter.

```
MATCH (m1:Method)-[:CALLS]->(m2:Method),
    (c1:Class)
WHERE
    (m2.is_setter OR m2.is_getter)
    AND c1-[:CLASS_OWNS_METHOD]->m1
    AND c1-[:CLASS_OWNS_METHOD]->m2
RETURN m1
```

Fig. 6. Cypher query to identify Internal getters and setters

Conclusions. This work describes a technology of identifying poor-quality code for Android projects written in Kotlin. It is based on the work of Hecht [5] and is an option to improve the Paprika tool and adapt it to the Kotlin programming language. The proposed approach uses source code instead of byte-code and complements the object-oriented metrics offered by Hecht. This will increase the number of antipatterns of identification and, using the work [14, 15], improve the accuracy of the results. The implementation of the described technology will effectively identify both object-oriented and Android-specific characteristics of poor quality code. As a future extension of the study, authors suggest to use proposed approach in developing software of antipatterns identification in Kotlin web-based applications or adapt it for Swift language, which is used in developing projects for iOS platform.

References

1. Counsell S., Rob M. H., Hamza H., Black S. Exploring the eradication of code smells: An empirical and theoretical perspective. *Advances in Software Engineering*. 2010, vol. 2010, p. 12. doi:10.1155/2010/820103.
2. Fowler M. Refactoring: *Improving the Design of Existing Code*. Boston: Addison-Wesley Professional, 2018. 448 p.
3. Rashedul I., Rofiqul I., Tahidul Arafhin M. Mobile application and its global impact. *International Journal of Engineering and Technology*. 2010, vol. 10, iss. 6, pp. 72–78.
4. Reimann J., Brylski M. A tool-supported quality smell catalogue for Android developers. *Softwaretechnik-Trends*. 2015, vol. 34, no. 2, pp. 44-46.
5. Hecht G., Rouvoy R., Moha N., Duchien L. Detecting antipatterns in Android apps. Lille: INRIA, 2015. 24 p.
6. Kessentini M., Ouni A. Detecting Android smells using multi-objective genetic programming. *ICMSES*. 2017, pp. 122–132. doi:10.1109/MOBILESoft.2017.29.
7. Palomba F., Di Nucci D., Panichella A. Lightweight detection of Android-specific code smells: the aDoctor project. *ICSAER*. 2017, 12 p. doi:10.1109/SANER.2017.7884659.
8. Linarez-Vasquez M., Klock S., McMillan C. Domain matters: bringing further evidence of the relationships among antipatterns, application domains, and quality-related metrics in Java mobile apps. *ICPC*. 2014, pp. 232–243. doi: 10.1145/2597008.2597144.
9. Moha N., Duchien L., Gueheneuc Y. DECOR: a method for the specification and detection of code and design smells. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2010, vol. 36, pp. 20–36. doi: 10.1109/TSE.2009.50.
10. Rasool G., Ali Arab A. Recovering Android Bad Smells from Android Applications. *Springer Berlin Heidelberg*. 2020, pp. 1–27. doi: 10.1007/s13369-020-04365-1.
11. Mannan A. M., Ahmed I., Almurshed R. A. M. Understanding code smells in Android applications. *ICMSES*. 2016, pp. 225–236. doi: 10.1109/MobileSoft.2016.048.
12. Azeem M.I., Palomba F., Shi, L., Wang, Q. Machine learning techniques for code smell detection: A systematic literature review and meta-analysis. *Information & Software Technology*. 2019, vol. 108, pp. 115–138.
13 Kotlin 2019 the state of Developer Ecosystem in 2019 Infographic. URL: https://www.jetbrains.com/lp/devecosystem-2019/kotlin/ (дата звернення 04.02.2020).
14 Chidamber S. R., Kemerer C. F. A metric suite for object oriented design. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1994, vol. 20, pp. 476–493.
15 Catolino G. Improving change prediction models with code smell-related information. Empir Software. 2019, p. 42.

References (transliterated)

1. Counsell S., Rob M. H., Hamza H., Black S. Exploring the eradication of code smells: An empirical and theoretical perspective. *Advances in Software Engineering*. 2010, vol. 2010, p. 12. doi:10.1155/2010/820103.
2. Fowler M. *Refactoring: Improving the Design of Existing Code*. Boston: Addison-Wesley Professional, 2018. 448 p.
3. Rashedul I., Rofiqul I., Tahidul Arafhin M. Mobile application and its global impact. *International Journal of Engineering and Technology*. 2010, vol. 10, iss. 6, pp. 72–78.
4. Reimann J., Brylski M. A tool-supported quality smell catalogue for Android developers. *Softwaretechnik-Trends*. 2015, vol. 34, no. 2, pp. 44-46.
5. Hecht G., Rouvoy R., Moha N., Duchien L. Detecting antipatterns in Android apps. Lille: INRIA, 2015. 24 p.
6. Kessentini M., Ouni A. Detecting Android smells using multi-objective genetic programming. *ICMSES*. 2017, pp. 122–132. doi:10.1109/MOBILESoft.2017.29.
7. Palomba F., Di Nucci D., Panichella A. Lightweight detection of Android-specific code smells: the aDoctor project. *ICSAER*. 2017, 12 p. doi:10.1109/SANER.2017.7884659.
8. Linarez-Vasquez M., Klock S., McMillan C. Domain matters: bringing further evidence of the relationships among antipatterns, application domains, and quality-related metrics in Java mobile apps. *ICPC*. 2014, pp. 232–243. doi: 10.1145/2597008.2597144.
9. Moha N., Duchien L., Gueheneuc Y. DECOR: a method for the specification and detection of code and design smells. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2010, vol. 36, pp. 20–36. doi: 10.1109/TSE.2009.50.
10. Rasool G., Ali Arab A. Recovering Android Bad Smells from Android Applications. *Springer Berlin Heidelberg*. 2020, pp. 1–27. doi: 10.1007/s13369-020-04365-1.
11. Mannan A. M., Ahmed I., Almurshed R. A. M. Understanding code smells in Android applications. *ICMSES*. 2016, pp. 225–236. doi: 10.1109/MobileSoft.2016.048.
12. Azeem M.I., Palomba F., Shi, L., Wang, Q. Machine learning techniques for code smell detection: A systematic literature review and meta-analysis. *Information & Software Technology*. 2019, vol. 108, pp. 115–138.
13 Kotlin 2019 the state of Developer Ecosystem in 2019 Infographic. Available at: https://www.jetbrains.com/lp/devecosystem-2019/kotlin/ (accessed 04.02.2020).

14 Chidamber S. R., Kemerer C. F. A metric suite for object oriented design. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1994, vol. 20, pp. 476–493.

15 Catolino G. Improving change prediction models with code smell-related information. *Empir Software*. 2019, p. 42.

Received 22.04.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Малік Іван Юрійович – бакалавр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1015-0603; e-mail: malik.ivan.yurich@gmail.com

Воловщиков Валерій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4454-2314; e-mail: valera@kpi.kharkov.ua

Шапо Владлен Феліксович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Одеська морська академія», доцент кафедри автоматичного управління і обчислювальної техніки; м. Одеса, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3921-4159; e-mail: stani@te.net.ua

Гринченко Марина Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри стратегічного управління; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8383-2675; e-mail: marinagrunchenko@gmail.com

Малик Иван Юрьевич – бакалавр, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1015-0603; e-mail: malik.ivan.yurich@gmail.com

Воловщиков Валерий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4454-2314; e-mail: valera@kpi.kharkov.ua

Шапо Владлен Феликсович – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет «Одесская морская академия», доцент кафедры теории автоматического управления и вычислительной техники; г. Одесса, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3921-4159; e-mail: stani@te.net.ua

Гринченко Марина Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры стратегического управления; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8383-2675; e-mail: marinagrunchenko@gmail.com

Malik Ivan Yuriyovich – bachelor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1015-0603; e-mail: malik.ivan.yurich@gmail.com

Volovshchykov Valeriy Yuriyovich – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4454-2314; e-mail: valera@kpi.kharkov.ua

Shapo Vladlen Felixovitch – Candidate of Technical Sciences, Docent, National University "Odessa Maritime Academy", Associate Professor of the Theory of Automatic Control and Computing Machinery Department; Odessa, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3921-4159; e-mail: stani@te.net.ua

Grinchenko Marina Anatoliyvna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Strategic Management; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8383-2675; e-mail: marinagrunchenko@gmail.com

UDC 004.05 **DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.20**

V. I. ZYBIN, I. V. LIUTENKO

DESIGNING INFORMATION SUPPORT FOR EVALUATING THE QUALITY OF EMBEDDED SOFTWARE

This article presents a system for evaluating the quality of embedded software using a decision system based on fuzzy logic. These approaches will improve the assessment of software quality, due to its features. This article defines the main criteria for software quality used in assessing the quality of the software. The main literature was examined, in which fuzzy logic was described, decision-making systems using fuzzy logic, as well as software quality assessment systems, including software for embedded systems. The main characteristics and properties of embedded systems were considered. Based on the considered characteristics and properties of embedded systems, the ranking of criteria was made, which will be further used in the software quality assessment methodology. The main criteria that are used to evaluate the quality of software were considered, and the criteria presented were distributed according to the degree of influence on the assessment of the quality of software of embedded systems. Fuzzy logic was considered, and more precisely: the basic properties of fuzzy logic and fuzzy numbers, the basic mathematical operators applied to fuzzy numbers. The system for constructing rules for the rule base, as well as the defuzzification process, built on the basis of the centroid method, is analyzed. An example of software evaluation for embedded systems was considered. In this example, linguistic variables were determined, as well as their numerical ranges, which were used for the initial assessment of the quality criteria of this software. Each range of ratings was distributed according to the influence of a criterion on software quality. The output linguistic variable and its numerical value were also determined. In the end, based on the set values, an estimate of the set software was derived. The theoretical result obtained in this article is the basis for constructing a system for evaluating software quality for embedded systems.

Keywords: decision-making, fuzzy logic, embedded systems, software quality, software assessments, software testing.

В. І. ЗИБІН, І. В. ЛЮТЕНКО

ПРОЕКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПЗ ВБУДОВАНИХ СИСТЕМ

У даній статті представлена система для оцінки якості програмного забезпечення вбудованих систем з використанням системи прийняття рішень на основі нечіткої логіки. Дані підхід дозволить поліпшити оцінку якості програмного забезпечення, за рахунок урахування його особливостей. У даній статті визначено основні критерії якості програмного забезпечення, використовувані при оцінці якості даного програмного забезпечення. Була оглянута основна література, в якій була описана нечітка логіка, системи прийняття рішень, що використовують нечітку логіку, а також системи оцінки якості програмного забезпечення, в тому числі і програмного забезпечення для вбудованих систем. Були розглянуті основні характеристики та властивості вбудованих систем. На підставі розглянутих характеристик і властивостей вбудованих систем виробилося ранжування критеріїв, які в подальшому будуть використовуватися в методиці оцінки якості програмного забезпечення. Були розглянуті основні критерії, які використовуються для оцінки якості програмного забезпечення, а також представлені критерії, які були розподілені за ступенем впливу на оцінку якості програмного забезпечення вбудованих систем. Була розглянута нечітка логіка, а точніше: основні властивості нечіткої логіки і нечітких чисел, основні математичні оператори, що застосовуються до нечітким числах. Розібрана система побудови правил для бази правил, а також процес дефазифікації, побудований на підставі центоїдного методу. Було розглянуто приклад оцінки програмного забезпечення для вбудованих систем. В даному прикладі були визначені лінгвістичні змінні, а також їх числові діапазони, які використовувалися для первісної оцінки критеріїв якості даного програмного забезпечення. Кожен діапазон оцінок був розподілений згідно впливу критерію на якість програмного забезпечення. Також була визначена вихідна лінгвістична змінна і її числове значення. В кінці, на основі заданих значень була виведена оцінка заданого програмного забезпечення. Отриманий теоретичний результат в даній статті є основою для побудови системи для оцінки якості програмного забезпечення для вбудованих системи.

Ключові слова: прийняття рішень, нечітка логіка, вбудовані системи, якість програмного забезпечення, оцінка програмного забезпечення, тестування програмного забезпечення.

В. И. ЗЫБИН, И. В. ЛЮТЕНКО

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПО ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ

В данной статье представлена система для оценки качества программного обеспечения встраиваемых систем с использованием системы принятия решений на основе нечёткой логики. Данные подход позволит улучшить оценку качества программного обеспечения, за счёт учёта его особенностей. В данной статье определены основные критерии качества программного обеспечения, используемые при оценке качества данного программного обеспечения. Была осмотрена основная литература, в которой была описана нечёткая логика, системы принятия решений, использующие нечёткую логику, а также системы оценки качества программного обеспечения, в том числе и программного обеспечения для встраиваемых систем. Были рассмотрены основные характеристики и свойства встраиваемых систем. На основании рассмотренных характеристик и свойств встраиваемых систем произвелось ранжирование критериев, которые в дальнейшем будут использоваться в методике оценки качества программного обеспечения. Были рассмотрены основные критерии, которые используются для оценки качества программного обеспечения, а также представленные критерии были распределены по степени влияния на оценку качества программного обеспечения встраиваемых систем. Была рассмотрена нечёткая логика, а точнее: основные свойства нечёткой логики и нечётких чисел, основные математические операторы, применяемые к нечётким числам. Разобрана система построения правил для базы правил, а также процесс дефазификации, построенный на основании метода центроидов. Был рассмотрен пример оценки программного обеспечения для встраиваемых систем. В данном примере были определены лингвистические переменные, а также их числовые диапазоны, которые использовались для первоначальной оценки критериев качества данного программного обеспечения. Каждый диапазон оценок был распределён согласно вилянию критериев на качество программного обеспечения. Также был определена выходная лингвистическая переменная и её числовое значение. В конце, на основе заданных значений была выведена оценка заданного программного обеспечения. Полученный теоретический результат в данной статье является основой для построения системы для оценки качества программного обеспечения для встраиваемых системы.

Ключевые слова: принятие решений, нечёткая логика, встраиваемые системы, качество программного обеспечения, оценка программного обеспечения, тестирование программного обеспечения.

© V. I. Zybin, I. V. Liutenko, 2020

Introduction. Test automation solution – is a realization (implementation) of a test automation architecture, i.e., a combination of components implementing a specific test automation assignment. According to ISO 25010, quality software meets the following criteria [1]:

- Functional Suitability;
- Performance efficiency;
- Compatibility;
- Usability;
- Reliability;
- Security;
- Maintainability;
- Portability.

Embedded systems are used everywhere, including in such areas as medicine, astronautics, etc. In this regard, the quality of embedded software is very important. After all, poor-quality software can cause huge losses.

Due to the growth of device functionality and, accordingly, the growth of software code sizes, quality is becoming an increasingly urgent problem. The literature uses many different ways to evaluate software quality. The main problem of all the proposed solutions is that they do not take into account the specific features of embedded software (for example, a small amount of memory in devices). To solve the problem of software quality, it is proposed to use fuzzy logic. The advantage of using fuzzy logic is that this approach will allow you to take into account the features of this type of software.

In this article, to solve the problem, we use literature describing fuzzy logic and the ISO 25010 standard to determine the main criteria for software quality. Zade [2] was one of the first to describe the basics of fuzzy logic. Gieseckea [3] examined various architectural constraints that should have served as the basis for software quality assessment. Siavvas [4] created the QATCH framework, which allows you to evaluate software quality based on customer requirements. Pasrija [5] used the choquet integral Approach to evaluate software quality. Ahrem [6] illustrates an example of the use of fuzzy logic in the decision-making system. Gorbachenko [7] is considering an ISO standard to create a software testing system. In the work of Klyuyev [8], fuzzy logic is used for a general assessment of the quality of software.

The advantage of fuzzy logic is that it allows you to take into account the features of a particular type of software. Such an approach has the advantage over others that increases the accuracy of the assessment.

The aim of this work is to develop a method for testing embedded software based on fuzzy logic.

This article consists of such sections. Introduction – where basic information is presented. In literature review discusses the main sources that was used when writing the article. Methods, the methodology of building a system is considered in this section. The results section discusses the results for the methods section. The conclusions section contains conclusions regarding to this work.

Literature review. In an age when embedded systems are becoming an increasingly large part of our lives, its quality should never be lower than ever. Now there are many new approaches to assessing the quality of software.

Zade [2] is one of the first to describe fuzzy logic.

Gieseckea [3] considered various architectural constraints that can be used for reuse and to improve the quality of software. He proposed to use two classes of architectural restrictions: Pattern-based concepts and Style-based concepts. The disadvantage of this approach is that it is always applicable. Since there are many programming languages and types of software, these architectures are not always possible to implement.

Siavvas [4] in his work proposed an adaptive framework for assessing the quality of the software QATCH (Quality Assessment Tool CHain). Based on the criteria of the ISO 25010 standard, this framework allows software evaluation. The disadvantage of this approach is that it is embedded in the program code. This approach does not take into account the limited resources of embedded systems and cannot be effectively used in such systems.

Pasrija [5] in his work suggested using Choquet Integral to evaluate software quality. This approach uses fuzzy numbers. But in this paper, a generalized example is used that does not take into account the features of each software.

The work of Ahrem [6] describes examples of the use of fuzzy logic in the decision-making system.

Gorbachenko [7] described the criteria and methodology for assessing software quality.

Klyuyev [8] uses fuzzy logic to evaluate software quality.

Garusi [9] gave a full review of the literature on evaluating the quality of embedded software. In his work, Google scholar and scopus were used as the main source of articles. As a result, the sample articles were classified by this type:

1. Test-case design;
3. Test scripting;
4. Test execution;
5. Test evaluation;
6. Test-result reporting;
7. Test automation;
8. Test management;
9. Other test engineering activities;

As a result, five of the most cited articles were highlighted.

The Minhas [10] in his article uses Regression testing to determine the quality of embedded software. The main idea of this approach is that it does not value the software of embedded systems itself, but rather shows the influence of the new functionality on the quality of the system.

Seo [11] in their article developed a system for evaluating the performance of embedded system software based on a kernel hack. This system is only capable of evaluating performance; therefore, it is not inconvenient to show possible errors in the software of the embedded system and other problems. An additional disadvantage of this system is that it requires output to connect the system and evaluate it.

Burakov [12] described the criteria and methodology for assessing software quality. The downside of this work is that some criteria are not suitable for embedded systems.

The work of and Pronina [13] describes examples of the use of fuzzy logic in the decision-making system.

Rudkovska [14] and Grinyaev [15] describe additional information about fuzzy sets. Those works describes the basic laws of fuzzy logic.

This article uses ISO 25010, on the basis of which linguistic variables are taken. The disadvantage of this approach is that it does not take into account the features of the programming language and the type of system.

Methods. The quality of a system is the degree to which the system satisfies the stated and implied needs of its various stakeholders, and thus provides the value. Those stakeholders' needs are precisely what is represented in the quality model, which categorizes the product quality into characteristics and sub-characteristics. To test the quality of testing, special quality criteria are used. One of the sources of such criteria is the ISO25010 standard. ISO/IEC 25010 comprises the eight quality characteristics [1] shown in the following fig. 1.

According to the ISO standard, these criteria have the following meaning:

Functional Suitability. This characteristic represents the degree to which a product or system provides functions that meet stated and implied needs when used under specified conditions. This characteristic is composed of the following sub-characteristics: functional completeness, functional correctness and functional appropriateness.

Performance Efficiency. This characteristic represents the performance relative to the amount of resources used under stated conditions. This characteristic is composed of the following sub-characteristics: time behavior, resource utilization and capacity.

Compatibility. Degree to which a product, system or component can exchange information with other products, systems or components, and/or perform its required functions while sharing the same hardware or software environment. This characteristic is composed of the following sub-characteristics: co-existence, interoperability.

Usability. Degree to which a product or system can be used by specified users to achieve specified goals with effectiveness, efficiency and satisfaction in a specified context of use. This characteristic is composed of the following sub-characteristics: appropriateness recognizability, learnability, operability, user error protection, user interface aesthetics and accessibility.

Reliability. Degree to which a system, product or component performs specified functions under specified conditions for a specified period. This characteristic is composed of the following sub-characteristics: maturity, availability, fault tolerance, recoverability.

Security. Degree to which a product or system protects information and data so that persons or other products or systems have the degree of data access appropriate to their types and levels of authorization. This characteristic is composed of the following sub-

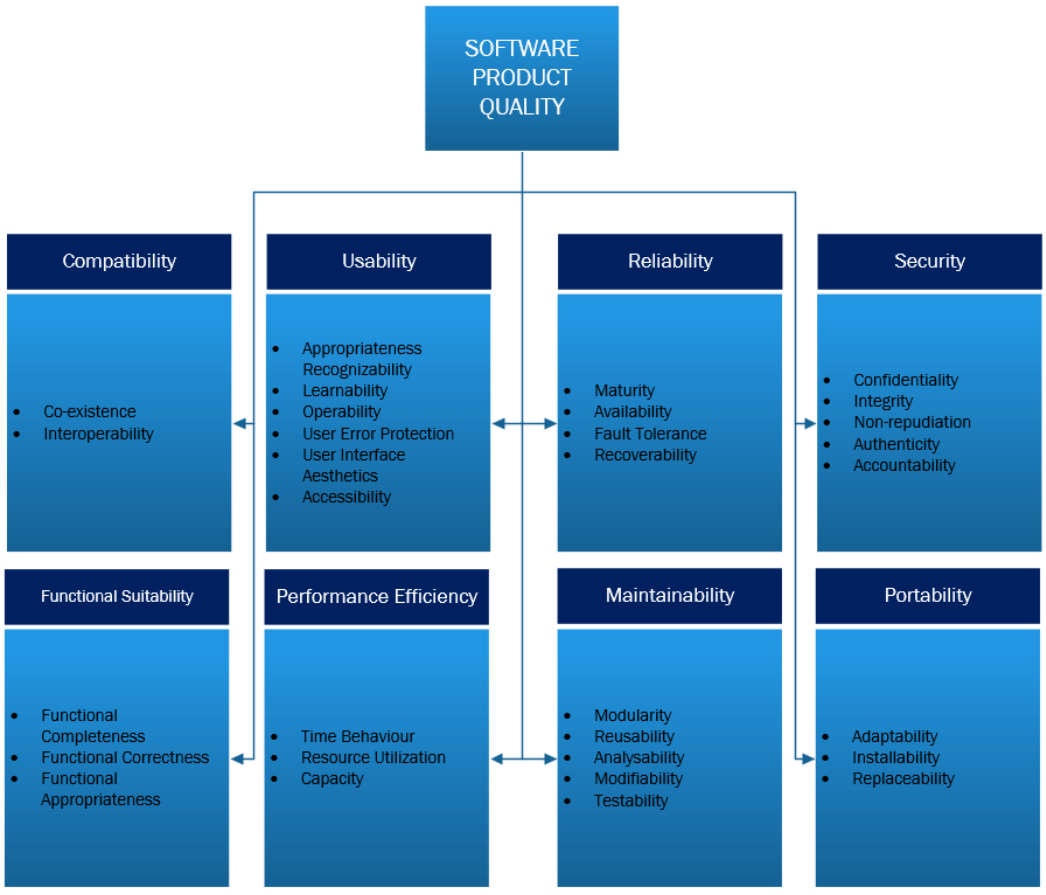


Fig. 1. Software quality criteria

characteristics: confidentiality, integrity, nonrepudiation, accountability, authenticity.

Maintainability. This characteristic represents the degree of effectiveness and efficiency with which a product or system can be modified to improve it, correct it or adapt it to changes in environment, and in requirements. This characteristic is composed of the following sub-characteristics: modularity, reusability, analysability, modifiability, testability.

Portability. Degree of effectiveness and efficiency with which a system, product or component can be transferred from one hardware, software or other operational or usage environment to another. This characteristic is composed of the following sub-characteristics: adaptability, installability, replaceability.

For a more effective assessment of software quality, each criterion should be divided according to the degree of influence. To separate the criteria, the basic properties of the software of embedded systems should be determined.

An embedded system is a controller programmed and controlled by a real-time operating system (RTOS) using a special function in a larger mechanical or electrical system.

The main features of the embedded systems are:

- real-time work (almost always);
- various, often difficult, operating conditions;
- autonomy of work (lack of operator, power restrictions);
- high requirements for reliability and safety of operation;
- limited resources;
- critical applications (Dependable Applications) related to human health and life.

Based on the features of embedded systems, quality criteria can be divided into the following categories:

- Criteria of high importance: Performance Efficiency, Usability, Reliability;
- Criteria of medium importance: Functional Suitability, Maintainability;
- Criteria of low importance: Compatibility, Security, Portability.

Fuzzy logic is used to evaluate the criteria. This approach is able to take into account how much each of the criteria is significant for determining the quality of software in embedded systems.

A fuzzy set is a class of objects with a continuum of grades of membership. Such a set characterized by a membership (characteristic) function that assigns to each object a grade of membership ranging between zero and one. The notions of inclusion, union, intersection, complement, relation, convexity, etc., extended to such sets, and various properties of these notions in the context of fuzzy sets are established. In particular, a separation theorem for convex fuzzy sets proved without requiring that the fuzzy sets be disjoint. L. A. Zadeh represented fuzzy sets algorithm in 1965. In that work for mathematical definition use X, which a space point (objects), with a generic element of X denoted by x. Thus, $X = \{x\}$. A fuzzy set (class) A in X is characterized by a membership (characteristic) function $f_A(x)$ which associates with each point 2 in X a real number in the interval [0, 1], with the value of $f_A(x)$ at x representing the "grade of membership" of x in A. Thus, the nearer the value of $f_A(x)$ to unity, the higher the grade of membership of x in A. When A is a set in the ordinary sense of the term, its membership function can take oil only two values 0 and 1, with $f_A(x) = 1$ or 0 according as x does or does not belong to A. Thus, in this case $f_A(x)$ reduces to the familiar characteristic function of a set A [2].

In the theory of fuzzy systems, fuzzy sets are those that are on the axis of real numbers. Fuzzy number can determine the set A, which is on the set of real numbers $A \subseteq R$, the membership function of which has the value $\mu_A: R[0, 1]$ and meets the conditions:

1. $\sup_{x \in R} \mu_A(x) = 1$, in other way the fuzzy set A is normalized;
2. $\mu_A[\lambda k_1 + (1 - \lambda)x \min\{\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)\}]$, in other way the fuzzy set A is convex;
3. $\mu_A(x)$.

Fuzzy sets can be divided into positive and negative. A fuzzy number is positive when $\mu_A(x) = 0$ for $x < 0$ all, negative when $\mu_A(x) = 0$ for all $x > 0$ [14].

Fuzzy numbers have their own binary operations, which are defined through generalizations of operations for clear numbers. These operators meet the conditions:

- addition $\mu_{A+B}(x) = \max\limits_{z = x + y} (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y))$; $\forall x, y, z \in R$;
- subtraction $\mu_{A-B}(x) = \max\limits_{z = x - y} (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y))$; $\forall x, y, z \in R$;
- multiplication $\mu_{A \cdot B}(x) = \max\limits_{z = x \cdot y} (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y))$; $\forall x, y, z \in R$;
- division $\mu_{A/B}(x) = \max\limits_{z = \frac{x}{y}, y \neq 0} (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y))$; $\forall x, y, z \in R$.

These algebraic operations have a very large volume of calculations, so often fuzzy numbers are represented in LR form, where L is the left part of the number, R is the right part of the number. The fuzzy number in LR form has form:

$$\begin{aligned} L\left(\frac{m - x}{\alpha}\right); \alpha > 0; \forall x \leq m, \\ R\left(\frac{m - x}{\beta}\right); \beta > 0; \forall x \leq m. \end{aligned} \quad (1)$$

Where L and R are functions that have the properties:

$$\begin{aligned} L(-x) = L(x), \\ L(0) = 1. \end{aligned} \quad (2)$$

The function L decreases monotonically on the interval $[0, +\infty]$. m is the mean value of the fuzzy number, α is the deviation from the mean value on the left, β is the deviation of the value on the right. If $\alpha = \beta = 0$, then the fuzzy number A becomes clear. Thus, fuzzy numbers in LR form can be represented as $A = \{m_A, \alpha_A, \beta_A\}$, and the operations have the form:

- addition operation: $A + B = (m_A, \alpha_A, \beta_A) + (m_B, \alpha_B, \beta_B) = (m_A + m_B, \alpha_A + \alpha_B, \beta_A + \beta_B)$;
- subtraction operation: $A - B = (m_A, \alpha_A, \beta_A) - (m_B, \alpha_B, \beta_B) = (m_A - m_B, \alpha_A - \alpha_B, \beta_A - \beta_B)$;
- multiplication operation: $A \cdot B = (m_A, \alpha_A, \beta_A) \cdot (m_B, \alpha_B, \beta_B) = (m_A \cdot m_B, m_B\alpha_A + m_A\alpha_B, m_B\beta_A + m_A\beta_B)$ [15];

To solve the problem of choosing an automated testing system, using a fuzzy inference, which determines the non-linear mapping of the input data vector into a scalar output value using fuzzy rules. A fuzzy logic output with a multidimensional output considered as a set of independent fuzzy logic outputs with a multidimensional input and a one-dimensional output.

A defuzzifier maps a fuzzy output set to a fuzzy set containing a range of output values. Defuzzifier converts to a single numerical value, convenient for further use. There are several methods of defuzzification: centroid, maximum and maximum centeroid method. In this paper, the centroid method is used.

In the centroid method, the center of gravity (centroid) is determined, which is the result of $\bar{y}$. For continuously and discretely defined values of fuzzy numbers of a set, respectively:

$$\bar{y} = \frac{\int_b^a y\mu(y)dy}{\int_b^a \mu(y)dy}, \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i\mu(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)}. \quad (6)$$

The scheme of the mechanism of logical conclusion is shown in fig. 2.

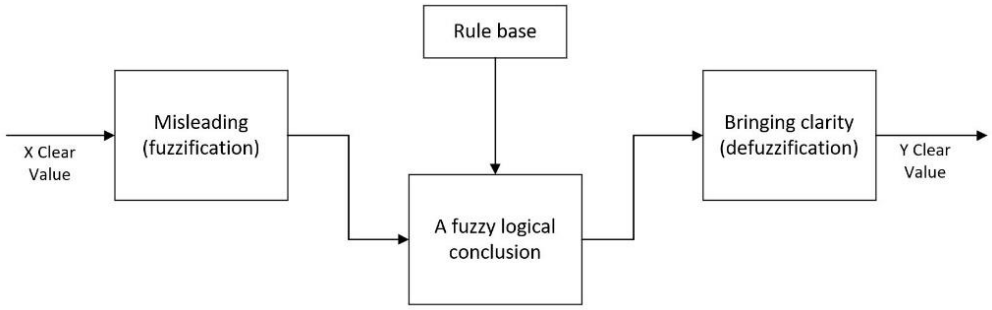


Fig. 2. Mechanism of logical conclusion

Fuzzy inference consists of three components: a fuzzifier, a logical inference mechanism, and a defuzzifier. The fuzzifier determines the degree to which input values belong to fuzzy input sets – linguistic variables.

The core of the inference mechanism is a rule base containing linguistic rules derived from static numeric data. Rule base consists of a set of rules in the format:

$$\begin{aligned} Rule \ = \ & \text{if } x_1 \text{ has } T_{x_1}^{any} \\ & \text{and if } x_2 \text{ has } T_{x_2}^{any} \ldots \\ & \text{and if } x_m \text{ has } T_{x_m}^{any} \\ & \text{then } y \text{ has } T_y^{any}, \end{aligned} \quad (3)$$

where x_1,x_2,x_m is linguistic variables, $T_{x_1}^{any}$, $T_{x_2}^{any}$, $T_{x_m}^{any}$, T_y^{any} is rules, y is linguistic output.

If more than one condition is used, then it is necessary to use a fuzzy operator to determine the result of applying this rule, that is, determine the degree of membership for a fuzzy set of outputs. To do this, use the minimum operators (3) and products (4):

$$\mu(y) = \min\big(\mu(x_1), \mu(x_2), \ldots, \mu(x_m)\big), \quad (4)$$

$$\mu(y) = \mu(x_1) \cdot \mu(x_2) \cdot \ldots \cdot \mu(x_m), \quad (5)$$

where $\mu(x_1) \cdot \mu(x_2) \cdot \ldots \cdot \mu(x_m)$ – degree to which the input values and the application result belong to the corresponding fuzzy sets of linguistic variables.

Results. An example of software evaluation is given as a result. To start the assessment, linguistic variables and their value of a fuzzy number should be determined.

Each of the criteria has such linguistic variables:

x_n = {bad, normal, good}, where $n = 1, 2, \ldots, n$, where n is total number of criteria.

Each criterion has its own range of values depending on the importance of this criterion. The ranges of values are presented in table 1.

Table 1 – Range of values for linguistic variables in different group

	Bad	Normal	Good
Criteria of high importance	[1, 4]	[5, 8]	[9, 10]
Criteria of medium importance	[1, 3]	[4, 7]	[8, 10]
Criteria of low importance	[1, 2]	[3, 6]	[7, 10]

The assessments of experts according to table 1 are converted from numerical variables to linguistic ones. Based on linguistic variables, a rule base is constructed according to formula (5). Based on these rules, a final grade is derived. The final grade is also a linguistic variable and has its own meanings: y = {bad quality, low quality, normal quality, above normal quality, high quality}. These linguistic variables have the following numerical values:

bad quality – 2, low quality – 4, normal quality – 6, above normal quality – 8, high quality – 10. For example, software that has such ratings:

- Functional Suitability – 8;
- Performance Efficiency – 6;
- Compatibility – 2;
- Usability – 6;
- Reliability – 8;
- Security – 9;
- Maintainability – 6;
- Portability – 4.

According to Table 1, these criteria have the following linguistic variables:

- Functional Suitability – Good;
- Performance Efficiency – Normal;
- Compatibility – Bad;
- Usability – Normal;
- Reliability – Normal;
- Security – Good;
- Maintainability – Normal;
- Portability – Normal.

According to the rule base, based on these values, the output score of this software is equal to: above average or in a garble value of 8.

Conclusions. This article describes the quality criteria and their impact on evaluating the quality of software for embedded systems, the basics of fuzzy logic and at the end describes an example of software evaluation. The described approach is noteworthy in that it allows to get an assessment of the quality of software based on its features, which allows you to improve the assessment of software quality.

This approach can be used not only to assess software quality. For example, in article [13], a system for spinning a solution based on fuzzy logic is used.

As a future work, writing a framework that, based on this issue, will evaluate the system.

References

1. *ISO/IEC 25010*. URL: http://iso25000.com/index.php/en/iso-25000-standards/iso-25010 (accessed 27.04.2020).
2. Zadeh L. A. Fuzzy Sets. *Information and control*. 1965. No. 8. P. 338–353.
3. Gieseckea S., Hasselbringa W., Riebischb M. Classifying architectural constraints as a basis for software quality assessment. *Advanced Engineering Informatics*. 2007. Vol. 21, issue 2. P. 169–179.
4. Siavvas M. G., Chatzidimitriou K. C., Symeonidis A. L. QATCH - An adaptive framework for software product quality assessment. *Expert Systems with Applications*. 2017. Vol. 86. P. 350–366.
5. Pasrija V., Kumar S., Srivastava P. R. Assessment of Software Quality: Choquet Integral Approach. *Procedia Technology*. 2012. Vol. 6. P. 153–162.
6. Ахрем А. А., Ашинянц М. Р., Петров С. А. Нечеткий логический вывод в системе принятия решений. *Труды ИСА РАН*. 2007. Т. 29. С. 265–275.
7. Горбаченко И. М. Оценка качества программного обеспечения для создания систем тестирования. *Фундаментальные исследования* 2013. № 6 (часть 4). С. 823–827.
8. Клюев Е.И., Гриненко Е.А. Подход к оценке качества программных средств. *Інженерія програмного забезпечення* 2014. № 3 (19). С. 5–14.
9. Garousia V., Feldererbe M., Karapıçakc Ç. M., Yılmazd U. Testing embedded software: A survey of the literature. *Information and Software Technology* 2018. Vol. 104. P. 14–45.
10. Mehmood N., Petersen M. K., Börstler J., Wnuk K. Regression testing for large-scale embedded software development – Exploring the state of practice. *Information and Software Technology*. 2020. Vol. 120. Article 106243.
11. Seo J., Choi B., Yang S. Lightweight embedded software performance analysis method by kernel hack and its industrial field study. *Journal of Systems and Software*. 2012. Vol. 85, issue 1. P. 28–42.
12. Бураков В.В. Методика оценки качества программных средств. Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 35–41.
13. Пронина О. И., Пятикоп Е. Е. Использование нечетких множеств при определении класса автомобиля. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 28 (1250). С. 41–48.
14. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. *Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы*. Москва: Горячая линия - Телеком, 2006. 452 с.
15. Гриняев Ю. В. *Теория нечетких множеств. Учебное пособие для студентов*. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2008. – 141 с.

References (transliterated)

1. *ISO/IEC 25010*. Available at: http://iso25000.com/index.php/en/iso-25000- standards/iso-25010 (accessed 27.04.2020).
2. Zadeh L. A. Fuzzy Sets. *Information and control* 1965, vol. 8, pp. 338–353.
3. Gieseckea S., Hasselbringa W., Riebischb M. Classifying architectural constraints as a basis for software quality assessment. *Advanced Engineering Informatics*. 2007, vol. 21, issue 2, pp. 169–179.
4. Siavvas M. G., Chatzidimitriou K. C., Symeonidis A. L. QATCH - An adaptive framework for software product quality assessment. *Expert Systems with Applications*. 2017, vol. 86, pp. 350–366.
5. Pasrija V., Kumar S., Srivastava P. R. Assessment of Software Quality: Choquet Integral Approach. *Procedia Technology*. 2012, vol. 6, pp. 153–162.
6. Ahrem A. A., Ashinyants M. R., Petrov S. A. Nechetkij logicheskij vyvod v sisteme prinyatiya reshenij [Fuzzy inference in the decision-making system]. *Trudy ISA RAN* [Proceedings of ISA RAN]. 2007, vol. 29, pp. 265–275.
7. Gorbachenko I. M. Ocenka kachestva programmnogo obespecheniya dlya sozdaniya sistem testirovaniya [Quality assessment of software for creating testing systems]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Basic research]. 2013, no. 6 (part 4), pp 823–827.
8. Klyuev E.I., Grinenko E.A. Podhod k ocenke kachestva programmnyh sredstv [Approach to software quality assessment]. *Inzheneriia prohramnoho zabespechennia* [Software Security Engineering]. 2014, no. 3 (19), pp. 5–14.
9. Garousia V., Feldererbe M., Karapıçakc Ç. M., Yılmazd U. Testing embedded software: A survey of the literature. *Information and Software Technology*. 2018, vol. 104, pp. 14–45.
10. Mehmood N., Petersen M. K., Börstler J., Wnuk K. Regression testing for large-scale embedded software development – Exploring the state of practice. *Information and Software Technology*. 2020, vol. 120, article 106243.
11. Seo J., Choi B., Yang S. Lightweight embedded software performance analysis method by kernel hack and its industrial field study. *Journal of Systems and Software*. 2012, vol. 85, issue 1, pp. 28–42.
12. Burakov V. V. Metodika ocenki kachestva programmnyh sredstv [Software Quality Assessment Methodology]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie* [News of higher educational institutions. Instrumentation]. 2008, vol. 51, no. 1, pp. 35–41..
13. Pronina O. I., Patykop E. E. Ispol'zovanie nechetkih mnozhestv pri opredelenii klassa avtomobilya [Using fuzzy sets when determining a car class]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»: zbirnyk naukovykh prats. Seriia: Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnolohii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Series: Systems Analysis, Control and Information Technology]. 2017, no. 28 (1250), pp. 41–48.
14. Rutkovska D., Pilinski M., Rutkovski L. Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. Warszawa, Łodź, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2004. 410 s. (Russ. ed.: Rutkovska D., Pilinski M.,

Rutkovski L. *Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy*. Moscow, Goryachaya liniya - Telekom Publ., 2006. 452 p.).
15. Grinyaev Yu. V. *Teoriya nechetkih mnozhestv. Uchebnoe posobie dlya studentov* [Theory of fuzzy sets. Study guide for students]. Tomsk, Tomskij gosudarstvennyj universitet sistem upravleniya i radioelektroniki Publ., 2008. 141 p.

Received 04.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Зибін Владислав Іванович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри Програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6299-3552; e-mail: vladyslavzybin2@gmail.com

Лютенко Ірина Вікторівна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4357-1826; e-mail: cherliv68@gmail.com

Зыбин Владислав Иванович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,студент кафедры Программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6299-3552; e-mail: vladyslavzybin2@gmail.com

Лютенко Ирина Викторовна – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4357-1826; e-mail: cherliv68@gmail.com

Zybin Vladyslav Ivanovich National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», student of the Department of Software Engineering and Information Technology Management; Kharkiv city, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6299-3552; e-mail: vladyslavzybin2@gmail.com

Liutenko Iryna Victorivna – Candidate of Engineering Sciences, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor, Department of Software Engineering and Management Information Technology; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4357-1826; e-mail: cherliv68@gmail.com

ЗМІСТ

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ 3
Смідович Л. С. Використання методів статистичного аналізу для виявлення аномалій показників якості послуг VoIP 3
Павлов А. А., Головченко М. Н. Построение одномерной и многомерной полиномиальной регрессии по избыточному описанию с использованием активного эксперимента 9
Чала О. В. Модель узагальненого представлення темпоральних знань для задач підтримки управлінських рішень 14
Чалий С. Ф., Лещинський В. О., Лещинська І. О. Модель пояснення в інтелектуальній інформаційній системі на основі концепції узгодженості знань 19
Ковтуненко А. Р., Яковлева О. В., Любченко В. А., Янголенко О. В. Дослідження сумісного використання математичної морфології та згорткових нейронних мереж для вирішення задачі розпізнавання цінників....24
Ситник Н. Л., Виноградова О. Є., Тягун Т. В., Мазничко А. Б. Класифікація документів страхового фонду документації України 31
Баранцев А. Ю., Клименко Н. М., Шевченко І. А. Проблемні питання збереження та обробки великих даних для забезпечення обліку та підготовки до експонування електронних фондів архівної установи в публічних електронних мережах 37
УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ 43
Куценко А. С., Коваленко С. В. Оптимальное управление ступенчатой трансмиссией транспортных средств 43
Білобородов О. О. Автоматизована система управління сканувальною антенною системою 49
УПРАВЛІННЯ В ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ 54
Sumskii A. A., Litvinova Y. S. Quantitive risk analisys of IT-startups 54
Orlovskyi D. L., Kopp A. M., Kondratiev V. Y. Development of a model and a software solution to support the analytical dashboards design problem 58
Гапон А. О., Федорченко В. М., Поляков А. О., Воловщиков В. Ю., Гужва В. О. Аналіз методології DevSecOps в процесах розробки програмного забезпечення 68
Orekhov S. V., Malyhon H. V. Virtual Promotion Knowledge Management Technology 74

МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ 79
Гнусов Ю. В., Клімушин П. С., Колісник Т. П., Можаєв М. О. Аналіз систем моделювання мікроконтролерів з додатковими модулями криптографічного захисту інформації 79
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ 85
Ульянко А. Л., Дорофеев Ю. И. Обзор методов автоматического распознавания эмоционального состояния человека по изображению 85
Батурін Є. Л., Воловщиков В. Ю., Шапо В. Ф. Інформаційна технологія підсистеми ідентифікації на основі електронних ключів в системах електронного документообігу 89
Sokol V. Y., Bronin S. V., Karnaukh V. E., Bilova M. O. Developing Adaptive Learning Management Application for Project Team in IT-Industry 97
Ключка Я. О., Шматко О. В. Порівняння технології блокчейн і спрямованого ациклічного графа при зберіганні і обробці даних в розподіленому реєстрі 106
Malik I. Y., Volovshchykov V. Y., Shapo V. F., Grinchenko M. A. Technology of identifying antipatterns in Android projects written in Kotlin language 117
Zybin V. I., Liutenko I. V. Designing information support for evaluating the quality of embedded software 124

CONTENT

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY 3
Smidovych L. S. Use of the statistical analysis methods to detect VoIP network traffic anomalies 3
Pavlov A. A., Holovchenko M. N. Univariate and multivariate polynomial regression construction from a redundant representation using an active experiment 9
Chala O. V. Model of generalized representation of temporal knowledge for tasks of support of administrative decisions 14
Chalyi S., Leshchynskyi V., Leshchynska I. Explanation model in an intelligent information system based on the concept of knowledge coherence 19
Kovtunenko A. R., Yakovleva O. V., Liubchenko V. A., Yanholenko O. V. Research of the joint use of mathematical morphology and convolutional neural networks for the solution of the price tag recognition problem 24
Sytnyk N. L., Vynohradova O. Y., Tiahun T. V. Maznychko A. B. Classification of documents of insurance fund of documentation of Ukraine 31
Barantsev A. Y., Klymenko N. M., Shevchenko I. A. Problems issues on saving and processing of big data to ensure the accounting and preparation for exposure of electronic funds of archive institution in public electronic networks 37
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS 43
Kutsenko O. S., Kovalenko S. V. Optimal control of a step-by-step transmission of vehicles 43
Biloborodov O. O. Automated control system of the scan antenna system 49
MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS 54
Sumskii A. A., Litvinova Y. S. Quantitive risk analisys of IT-startups 54
Orlovskyi D. L., Kopp A. M., Kondratiev V. Y. Development of a model and a software solution to support the analytical dashboards design problem 58
Hapon A. O., Fedorchenko V. M., Poliakov A. O., Volovshchykov V. Y., Guzhva V. A. Analysis of DevSecOps methodology in software development processes 68
Orekhov S. V., Malyhon H. V. Virtual Promotion Knowledge Management Technology 74
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING 74
Gnusov Yu. V., Klimushyn P. S., Kolisnyk T. P., Mozhaiev M. O. Analysis of systems of modeling of microcontrollers with additional modules of cryptographic information protection 79
INFORMATION TECHNOLOGY 85
Ulianko A. L., Dorofieiev Y. I. Review of automatic recognition methods of human emotional state using image 85
Baturin Y. L., Volovshchykov V. Y., Shapo V. F. Information technology of the identification subsystem based on electronic keys in electronic document management systems 89
Sokol V. Y., Bronin S.V., Karnaukh V.E., Bilova M.O. Developing Adaptive Learning Management Application for Project Team in IT-Industry 97
Kliuchka Y. O., Shmatko O. V. Comparison of blockchain technology and directed acyclic graph during data storage and processing in a distributed registry 106
Malik I. Y., Volovshchykov V. Y., Shapo V. F., Grinchenko M. A. Technology of identifying antipatterns in Android projects written in Kotlin language 117
Zybin V. I., Liutenko I. V. Designing information support for evaluating the quality of embedded software 124

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ». СЕРІЯ: СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ, УПРАВЛІННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Збірник наукових праць

№ 1 (3) 2020

Наукові редактори: М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
О. С. Куценко, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор: М. І. Безменов, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск М. І. Безменов, канд. техн. наук, професор

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій
Тел.: (057) 707-61-03, (057) 707-66-54; e-mail: bezmenov@kpi.kharkov.ua

Підп. до друку 07.07.2020 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк цифровий. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 12,0. Облік.-вид. арк. 12.
Тираж 100 пр. Зам. № 78. Ціна договірна.

Друкарня «ФОП Пісня О. В.»
Свідоцтво про державну реєстрацію ВО2 № 248750 від 13.09.2007 р.
61002, Харків, вул. Гіршмана, 16а, кв. 21, тел. (057) 764-20-28