

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Нові рішення в
сучасних технологіях**

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: New solutions in
modern technology**

№ 4(14)' 2022

No. 4(14)' 2022

Збірник наукових праць

Collection of Scientific papers

Видання засноване у 1961 р.

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2022

Kharkiv
NTU "KhPI", 2022

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2022. — № 4(14). — 83 с. — ISSN 2079-5459.

Видання публікує наукові результати та досягнення мультидисциплінарних досліджень молодих науковців широкого профілю у сферах машинобудування, енергетики, технологій органічних і неорганічних речовин, екології, інформаційних технологій і систем управління, техніки та електрофізики високих напруг, а також з фундаментальних аспектів сучасних технологій.

The journal publishes scientific results and accomplishments of multidisciplinary researches of young scientists of a wide profile in the field of machine building, energy, technologies of organic and inorganic substances, ecology, information technologies and control systems, high voltage techniques and electrophysics, as well as on the fundamental aspects of modern technologies.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України КВ № 23776-13616 від 14 лютого 2019 року.

Мова статей – українська, англійська.

Офіційний сайт видання: <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/>

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях включено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії», **категорія «Б»** (накази МОН України № 409 від 17.03.2020 р. та №886 від 02.07.2020 р.).

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях» включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща), 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).

Засновник

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Редакційна колегія

Відповідальний редактор:

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАНУ, НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Авдєєва О. П., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Байрачний В. Б., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Березка Т. О., НТУ «ХПІ», Україна

Брагіна Л. Л., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Бурлака М. В., SoftInWay Inc., США

Глушко А. В., НТУ «ХПІ», Україна

Гораш Є., проф., Університет Стратклайда, Великобританія

Гринченко Н. Г., доц., ХДУХТ, Україна

Данильченко Д. О., НТУ «ХПІ», Україна

Демидов І. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Єнікєєв О. Ф., доц., ДДМА, Україна

Заковоротний О. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Колодяжна Л. В., ІПМаш НАНУ, Україна

Костик К. О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Куліченко В. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Ларін О. О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Львов Г. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Мазасва В. С., УкрНДІОЖ НАНУ, Україна

Меньшикова С. І., НТУ «ХПІ», Україна

Мінакова К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Моїсєєв В. Ф., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Ноздрачова К. Л., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Носенко Т. Т., проф., НУХТ, Україна

Папченко В. Ю., УкрНДІОЖ НАНУ, Україна

Піментел С. Р., проф., Федеральний Університет Гояс, Бразилія

Пітак І. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Плеснецов С. Ю., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Раскін Л. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Руденко С. С., НДПІКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», Україна

Селін Р. В., ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, Україна

Сучков Г. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Тихомірова Т. С., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Томашевський Р. С., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Філенко О. М., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Хохлов М. А., ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, Україна

Шевченко С. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Шестопапов О. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Шідакова-Каменюка О. Г., доц., ХДУХТ, Україна

Editorial staff

Associate editor:

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of NASU, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Avdieieva O. P., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Bairachnyi V. B., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Berezka T. O., NTU "KhPI", Ukraine

Bragina L. L., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Burlaka M. V., SoftInWay Inc., United States

Glushko A. V., NTU "KhPI", Ukraine

Gorash Ye., prof., University of Strathclyde, UK

Grynchenko N. G., docent, HDUHT, Ukraine

Danylchenko D. O., NTU "KhPI", Ukraine

Demidov I. N., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Yenikieiev O. F., docent, DSEA, Ukraine

Zakovorotniy A. Yu., prof., NTU "KPI", Ukraine

Kolodyazhnaya L. V., IPMash NASU, Ukraine

Kostyk K. O., prof., NTU "KPI", Ukraine

Kulichenko V. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Larin A. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Lvov G. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Mazaeva V. S., UkrRIOF NASU, Ukraine

Menshikova S. I., NTU "KhPI", Ukraine

Minakova K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Moiseev V. F., prof., NTU "KPI", Ukraine

Nozdrachova K. L., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Nosenko T. T., prof., NUFT, Ukraine

Papchenko V. Yu., UkrRIOF NASU, Ukraine

Pimentel S., prof., Federal University of Goias, Brazil

Pitak I. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Plesnetsov S. Yu., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Raskin L. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Rudenko S. S., RDI "Molniya" NTU "KhPI", Ukraine

Selin R. V., E.O. Paton EWI NASU, Ukraine

Suchkov G. M., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Tykhomyrova T. S., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Tomashevskiy R. S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Filenko O. M., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Khokhlov M. A., E.O. Paton EWI NASU, Ukraine

Shevchenko S. Yu., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Shestopalov A. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Shidakova-Kamenyuka E. G., docent, HDUHT, Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 10 від 20 грудня 2022 р.

УДК 621.1.016.4:621.1.016.7

doi:10.20998/2413-4295.2022.04.01

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПАРОГАЗОВИХ УСТАНОВОК З ІНТЕГРАЦІЄЮ ТВЕРДООКСИДНИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

А. О. КОСТИКОВ, В. О. ТАРАСОВА*, М. О. КУЗНЕЦОВ, М. Г. ГАНЖА, А. О. МАЗУР

Відділ моделювання та ідентифікації теплових процесів в енерготехнологічному обладнанні, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків, УКРАЇНА

**e-mail: tarasova@ipmach.kharkov.ua*

АНОТАЦІЯ На сьогодні вкрай актуальною задачею є збільшення генерації електроенергії в Україні, яку можна вирішити за короткий термін не скільки створенням нових електростанцій, скільки модернізацією потужних паросилових установок існуючих теплоелектростанцій. Розроблено концептуальні рішення використання газотурбінного циклу та технології твердооксидних паливних елементів (ТОПЕ) як надбудови до існуючих потужних паротурбінних установок (ПТУ) для підвищення ефективності та екологічності їх роботи. У роботі розглянуто шляхи комплексної модернізації на прикладі енергоблоків ТЕЦ-5 м. Харкова з турбінами Т-110/120-130. Як надбудову запропоновано використання газотурбінної установки (ГТУ) ГТЕ-60 потужністю 60 МВт, що виробляється на підприємстві ДП НВКГ «Зоря-Машпроект», м. Миколаїв. Також розглянуто інтеграцію у парогазову схему «Т-110/120-130 – ГТЕ-60» модульної установки ТОПЕ з внутрішнім риформінгом сумарною потужністю 20 МВт, яку скомпоновано з 40 трубчастих паливних елементів потужністю 500 кВт. При дослідженні конденсаційного режиму роботи ПТУ отримано наступні результати: електричний ККД стандартної схеми паралельного підключення ГТУ до ПТУ з підведенням виробленої у котлі-утилізаторі пари до частини середнього тиску ПТУ становить 42 %, сумарна електрична потужність установки – 170 МВт; при паралельному підключенні ГТУ до ПТУ з підведенням виробленої у котлі-утилізаторі пари до частини високого тиску (ЧВТ) електричний ККД сягає 44,75 %, сумарна електрична потужність становить 170 МВт (при роботі такої схеми у котлі-утилізаторі здійснюється перегрів пари за рахунок додаткового спалення газу); скидна схема підключення ГТУ до ПТУ з ТОПЕ та заміщенням регенерації забезпечує електричний ККД 46 % та сумарну електричну потужність 190 МВт; у схемі паралельного підключення ГТУ та ТОПЕ до ПТУ з підведенням виробленої пари до ЧВТ електричний ККД складає 49,4 % при сумарній електричній потужності 190 МВт. Проведено порівняльний енергетичний аналіз різних варіантів комбінованих схемних рішень щодо модернізації діючого енергоблоку ТЕЦ-5, який показав, що найбільше підвищення електричного ККД на 12 % порівняно з діючою паровою турбіною Т-100/120-130 досягається у схемі паралельного підключення ГТУ ГТЕ-60 до неї з допалюванням газу у котлі-утилізаторі та ТОПЕ сумарної потужності 20 МВт.

Ключові слова: парова турбіна; газотурбінна установка; комбінований цикл; твердооксидний паливний елемент; енергетична ефективність; модернізація

EFFICIENCY EVALUATION OF STEAM-GAS PLANTS WITH THE SOLID OXIDE FUEL CELLS INTEGRATION

A. KOSTIKOV, V. TARASOVA, M. KUZNETSOV, M. GANZHA, A. MAZUR

Department of Modeling and Identification of Thermal Processes in Power Engineering Equipment, A. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of National Academy of Science of Ukraine, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Today in Ukraine the generation of electricity increasing is an extremely urgent task, which can be solved in a short period not only by the creation of new power plants, but by the modernization of high-power steam power units of existing thermal power plants. The conceptual solutions for the use of the gas turbine cycle and solid oxide fuel cell (SOFC) technology as an add-on to existing high-power steam turbines to increase the efficiency and environmental friendliness of their operation was developed. The paper considers the ways of complex modernization on the example of power units of CHPP-5 in Kharkiv with T-110/120-130 steam turbines. As an add-on, it is proposed to use the GTE-60 gas turbine unit with a capacity of 60 MW, produced at the Zorya-Mashproekt State Enterprise, Mykolaiv. Also, the integration into the "T-110/120-130-GTE-60" steam-gas circuit of a modular SOFC unit with internal reforming with a total capacity of 20 MW, which is composed of 40 tubular fuel cells with a capacity of 500 kW is considered. In the study of the condensation mode of the steam turbine operation, the following results were obtained: with the standard scheme of parallel connection of the gas turbine unit to the steam turbine with the supply of steam produced in the heat recovery steam generator (HRSG) to the medium-pressure turbine, the electrical efficiency was 42%, and the total electrical power of the installation was 170 MW; when the gas turbine unit was connected in parallel to the steam turbine with the supply of steam produced in the HRSG to the high-pressure turbine, the electrical efficiency reached 44.75%, and the total electrical power was 170 MW (during the operation of such a scheme, the steam is overheated due to additional combustion of gas in the HRSG); the waste circuit for connecting the gas turbine unit to the steam turbine with SOFC and regeneration substitution provided the electrical efficiency of 46% and the total electrical power of 190 MW; in the scheme of parallel connection of the gas turbine unit and SOFC to the steam turbine with the supply of produced steam to the high-

pressure turbine, the electrical efficiency was 49.4% with the total electrical power of 190 MW. A comparative energy analysis of various options for combined circuit solutions for the modernization of the existing power unit of CHPP-5 was performed. This analysis showed that the greatest increase in electrical efficiency by 12% compared to the existing T-100/120-130 steam turbine was achieved in the scheme of parallel connection of the GTE-60 gas turbine unit with gas afterburning in the HRSG and SOFC with a total capacity of 20 MW.

Keywords: steam turbine; gas turbine; combined cycle; solid oxide fuel cell; energy efficiency; modernization

Вступ

Раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів при генерації електроенергії є однією з глобальних світових проблем, успішне вирішення якої має визначальне значення не тільки для подальшого розвитку світової спільноти, а й для збереження середовища її проживання.

На сьогодні основним паливом для електростанцій України залишається природний газ, використовувати який більш ефективно можна в комбінованих парогазових установках (ПГУ), в яких основна частина палива вводиться в газовий контур.

При характерній для ГТУ високій температурі підведення теплоти і низької, близької до температури навколишнього середовища, температури відведення тепла в конденсаторі ПТУ, відношення температур гарячого і холодного джерел тепла в комбінованому циклі ПГУ і його ККД значно збільшуються. При ККД сучасних ГТУ, що дорівнює 37–40 %, частка теплоти відпрацьованих в турбіні газів (яка при автономній роботі відносилася би до втрат) становить 60–62 % теплоти палива, спаленого в камері згоряння ГТУ. При ККД парового циклу 30–35 % [1], нижчому, ніж в сучасних енергоблоках високого і надкритичного тиску [2], ККД комбінованої установки дорівнює 42–60 % [3,4]. Парогазові установки характеризуються високим коефіцієнтом використання палива (до 90 %). При спалюванні 1 м³ природного газу можна отримати 4–5 кВт·год електроенергії і 3–4 кВт·год теплової енергії (в еквіваленті) [5].

У роботах [6,7] наведено приклади розроблених в світі ПГУ, та показано що для забезпечення практичної надійності, теплової економічності, невисокої питомої вартості і експлуатаційних витрат сьогодні проектують енергетичні ГТУ за найпростішим циклом на максимально досягну температуру газів зі ступенями підвищення тиску, близькими за питомою роботою і ККД до оптимальної для комбінованих установок, в яких використовується теплота відпрацьованих в турбіні газів. На сьогодні на базі ГТЕ-60 ДП НВКГ «Зоря-Машпроект» розроблено ряд парогазових установок різної потужності. Парогазові установки ПГУ-85 потужністю 85 МВт і ПГУ-170 потужністю 168 МВт мають коефіцієнт корисної дії не нижче 52 % [8,9].

Ще більше підвищення ефективності ТЕЦ (майже до 65 %) можливо шляхом створення комбінованих енергетичних установок, що включають

у якості надбудови як газотурбінну установку, так і інноваційні екологічно чисті твердооксидні паливні елементи (ТОПЕ). Останні можуть виробляти раціональну, надійну, економічну енергію без суттєвих викидів, що завдають шкоди навколишньому середовищу. Використовуючи модульну конфігурацію, теплоенергетичні установки на відомих на сьогоднішній день карбонатних паливних елементах можуть виробляти від 0,3 МВт до 30 МВт електричної енергії [10]. Теплоенергетичні установки на ТОПЕ використовують технологію, яка працює при високих температурах і дозволяє використовувати природний газ без зовнішньої системи риформінгу. Риформінг вуглеводневого палива в водень відбувається безпосередньо у батареї паливного елемента [11,12].

Аналіз стану енергоблоків теплової енергетики, що експлуатуються на українських ТЕЦ, показав, що до енергоблоків з меншим відпрацьованим ресурсом відносяться блоки ТЕЦ потужністю 100 МВт та 250 МВт. Так, наприклад, енергоблоки Харківської ТЕЦ-5 згідно з терміном їх введення в експлуатацію та меншому спрацьованому ресурсу можливо розглянути як приклад для реконструкції.

Таким чином, на сьогодні край актуальною задачею є збільшення генерації електроенергії в Україні, яку можна вирішити за короткий термін не скільки створенням нових електростанцій, скільки модернізацією потужних паросилових установок існуючих теплоелектростанцій шляхом впровадження як надбудови паротурбінної установки газотурбінного циклу та технології твердооксидних паливних елементів. Для виконання цієї задачі необхідно обрати ГТУ з існуючого модельного ряду, пакет блоків ТОПЕ оптимальної потужності та схему їх включення до енергетичної схеми ТЕЦ, які б забезпечували найбільше підвищення електричного ККД та коефіцієнта використання палива при максимальному збереженні технологічної вихідної схеми ТЕЦ і найменших витратах на її модернізацію.

Мета роботи

Мета дослідження полягає у розробленні концептуальних рішень використання газотурбінного циклу та технології твердооксидних паливних елементів як надбудови до існуючих потужних паротурбінних установок для підвищення ефективності та екологічності їх роботи.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні задачі, а саме, по-перше, запропонувати різні варіанти комбінованих схем щодо реконструкції

діючого енергоблоку ТЕЦ потужністю 100 МВт, по-друге, провести порівняльний аналіз за їх енергетичною ефективністю.

Енергетичний аналіз схемних рішень модернізації енергоблоків теплоелектростанцій

Як приклад розглядається модернізація енергоблоку з паровою турбіною Т-100/120-130 [13]. Принципову теплову схему турбіни Т-100/120-130 представлено на рис. 1. Відпустка тепла споживачам здійснюється наступним чином: пар з двох теплофікаційних регульованих відборів подається на дві мережеві підігрівальні установки (МП), які включено послідовно. Гаряча вода на опалення підігрівається у двох мережевих підігрівачах і піковому водогрійному котлі (ПВК). Система регенерації складається з чотирьох підігрівачів низького тиску (ПНТ), деаератора (Д) і трьох підігрівачів високого тиску (ПВТ). Тип підключення – каскадний (без використання дренажних насосів (ДН)). У схемі (рис. 1) використовується котел барабанного типу (ЕК), в якому організоване безперервне продування. Для зменшення втрат тепла продувальна вода прямує в двоступеневий розширювач безперервного продування (Р-1, Р-2), а потім – в регенеративний підігрівач хімічно очищеної води (ПХ) з хімводоочищення (ХВО) і скидається в каналізацію. З Р-1 випар направляється в Д, з Р-2 – в підігрівач низького тиску (ПНТ) ПНТ-6. Пар з ущільнень надходить в сальниковий підігрівач (СП), а з основних ежекторів конденсатора – в охолоджувач ежекторного пара (Еж), що сприяє додатковому підігріву основного конденсату.

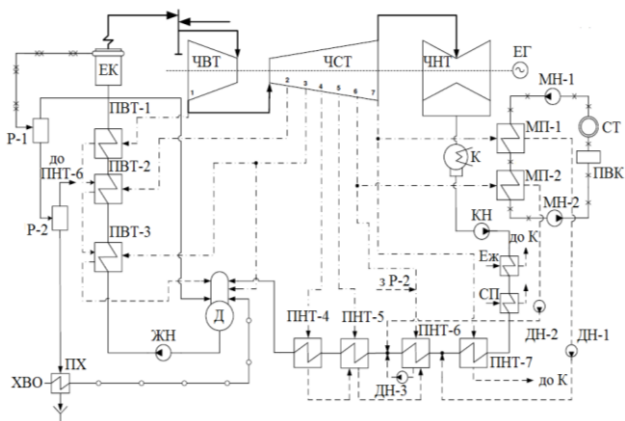


Рис. 1 – Схема енергоблоку з турбіною Т-100/120-130
ЧВТ, ЧСТ, ЧНТ – частини високого, середнього та низького тисків парової турбіни, СТ – споживач теплоти, ЖН, КН, МН – живильний, конденсатний, мережевий насоси, ПВК – піковий водогрійний котел

Заводські дані для турбіни Т-100/120-130 наступні: електрична потужність $N_e = 100$ МВт; тепла потужність опалювальних відборів

$Q_{\text{відб}} = 150$ МВт; початкові параметри пари: тиск $P_0 = 127,5$ бар; температура $T_0 = 555$ °С; розрахункові значення внутрішнього відносного ККД по відсіках: $\eta_{\text{oi}}^{\text{ЧВТ}} = 95$ %, $\eta_{\text{oi}}^{\text{ЧСТ}} = 95$ %, $\eta_{\text{oi}}^{\text{ЧНТ}} = 97$ %. Електромеханічний ККД $\eta_{\text{ем}} = 0,98$; ККД транспорту $\eta_{\text{тр}} = 0,98$; ККД підігрівачів поверхневого типу $\eta_{\text{то}} = 98$ %.

На рис. 2 представлено залежність електричної і теплової потужності турбіни від витрати гострої пари, яку отримано за трьома точками для витрати пари, а саме: номінальна (115 кг/с), максимальна (134,7 кг/с) та проміжна (67,4 кг/с) витрати пари G_T . Як проміжна витрата пари була обрана витрата, яка дорівнює 50 % від максимального значення G_T . В усіх розрахунках приймалося, що витоки пари деаератора становлять 2 % від витрати гострої пари.

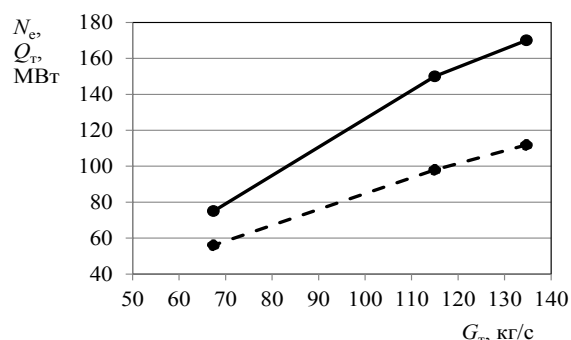


Рис. 2 – Залежність електричної (-----) і теплової (—) потужності турбіни від витрати гострої пари у теплофікаційному режимі

Сучасні ТЕЦ працюють, як правило, на турбінах з відбором пари, основною перевагою яких є можливість роботи за незалежним графіком електричного і теплового навантажень. У конденсаційному режимі турбіна працює близько 2000–2500 годин на рік. Електричний ККД парової турбіни, що працює в теплофікаційному режимі, становить близько 30 %, а в конденсаційному режимі – близько 37 %.

Враховуючи наведене вище, у роботі пропонується провести оцінку і обґрунтувати підвищення ефективності ТЕЦ шляхом створення комбінованих енергетичних установок, що включають як надбудову газотурбінну установку, а також інноваційні екологічно чисті ТОПЕ.

Газотурбінна установка ГТЕ-60, що розглядається як надбудова до ПСУ, працює за стандартним циклом Брайтона. Ступінь стиснення повітря у компресорі (КМ) ГТЕ-60 дорівнює 18, температура робочого тіла після камери згоряння (КЗ) на вході в газову турбіну (ГТ) досягає близько 1295 °С. Витрата газу метану в процесі горіння складає 3 кг/с. Отримані на основі експериментальних даних ізоентропні ККД дорівнюють 75,2 % і 92,0 % для компресора і турбіни, відповідно, а ККД КЗ – 98 % [8,9]. Подальші розрахунки проводилися для

номінального режиму роботи, в якому вироблена корисна потужність ГТЕ-60 дорівнює 60 МВт при ККД 37 %.

Кількість блоків ТОПЕ та варіанти схеми їх підключення визначались за допомогою зосередженого підходу до термодинамічного аналізу кожного елемента енергетичної установки [14,15].

У табл. 1 наведено основні параметри модульної установки сумарною потужністю 20 МВт з 40 трубчастих ТОПЕ з внутрішнім риформінгом. Габарити одного модуля ТОПЕ 500 кВт: діаметр 2 м, висота 2,8 м [10].

Таблиця 1 – Параметри трубчастої моделі ТОПЕ потужністю 500 кВт [10]

Корисна електрична потужність ТОПЕ	500 кВт
Температура на вході трубчастого ТОПЕ	800 °С
Температура на виході трубчастого ТОПЕ	1000 °С
Ефективність ТОПЕ по виробленню електроенергії	55 %

Розглянуто різні варіанти можливого комбінювання парової турбіни з газовою турбіною, а також з паливними елементами.

На рис. 3 наведено стандартну схему паралельного підключення ГТУ до ПТУ. Температура відхідних газів від ГТЕ-60 становить 517 °С. Це не дозволяє нагріти пару в котлі-утилізаторі (КУ) до необхідної температури гострої пари, що подається на частину турбіни високого тиску, тому додаткова витрата пари подається на циліндр середнього тиску.

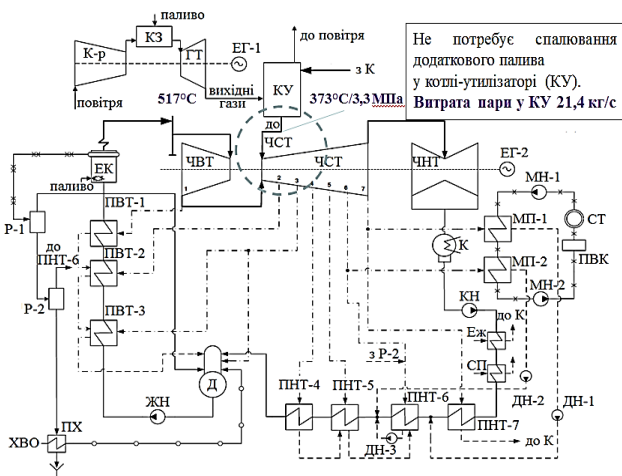


Рис. 3 – Схема паралельного підключення ГТУ до ЧСТ ПТУ (схема А)

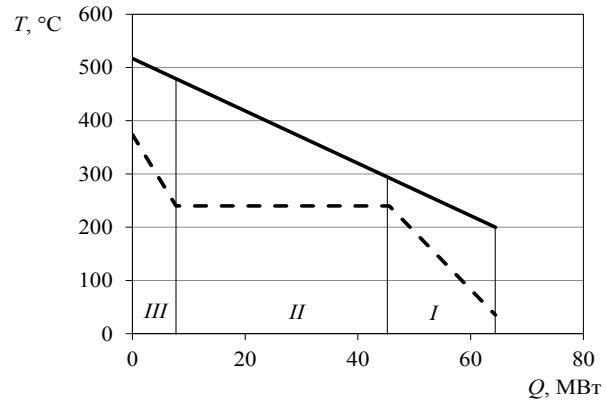
На рис. 4 показано зміну температури відхідного газу з ГТ і пароводяного робочого

середовища у котлі-утилізаторі за противотоковою схемою відповідно переданому тепловому потоку.

Таке підключення дозволяє збільшити електричний ККД енергоустановки до 42 %, а сумарну електричну потужність установки – до 170 МВт у конденсаційному режимі.

При такому підключенні ГТУ до ПТУ схема паротурбінної установки практично не змінюється. Тому капітальні вкладення при модернізації будуть витрачені в основному на газотурбінну установку з котлом-утилізатором.

На рис. 5 показано паралельне підключення ГТЕ-60 з допалюванням газу у КУ. При цьому пара у КУ нагрівається до температури гострої пари 555 °С і має тиск 12,8 МПа. Це дозволяє направляти пар з КУ до ЧВТ. У конденсаційному режимі таке підключення дозволяє підвищити електричний ККД комбінованої установки до 44,75 % (сумарна електрична потужність становить 170 МВт), а в теплофікаційному – до 37,89 %.



— температура відхідного газу; - - - температура пароводяного робочого середовища; I – економайзер; II – бойлер; III – перегрівач пари

Рис. 4 – Діаграма передачі теплоти в КУ (схема А)

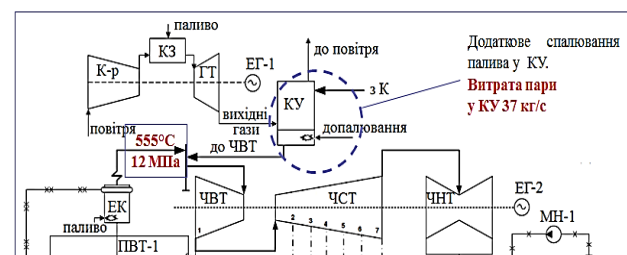


Рис. 5 – Частина теплової схеми паралельного підключення ГТУ до ЧВТ ПТУ (схема Б)

З рис. 6 видно, що відхідні газы з ГТ мають достатню температуру на здійснення процесу нагріву живильної води, випаровування та перегріву пари у КУ.

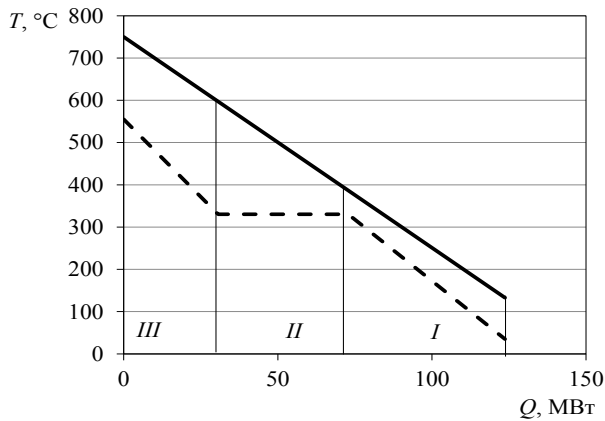


Рис. 6 – Діаграма передачі теплоти в КУ (схема В) (підпис див. рис. 4)

На рис. 7 та рис. 8 представлений ще один варіант паралельного підключення, в якому догрів пари до необхідної температури гострої пари здійснюється за рахунок теплоти відхідних газів, що йдуть від модульної збірки з ТОПЕ (див. табл. 1) сумарної потужністю 20 МВт і допалюванням додаткового газу. Температура відхідних газів в цьому випадку становить 740 °С, що дозволяє здійснити перегрів пари до потрібної температури (рис. 8). З урахуванням утилізації теплоти димових газів, що йдуть з ГТУ і паливних елементів, в КУ теплота на нагрівання, випаровування води і перегрів пари становить 133,12 МВт. Електричний ККД такої енергоустановки складатиме 49,4 % при сумарній потужності 190 МВт у конденсаційному режимі. Витрата води, що надходить в енергетичний котел ПТУ, в конденсаційному режимі складе 57,0 кг/с (111 кг/с для циклу ПТУ).

Розглянуто класичну скидну схему підключення ГТУ до ПТУ. У такій схемі (рис. 9) гази, що йдуть з ГТУ, надходять в енергетичний котел енергоустановки ПТУ на горіння замість підігрітого повітря. Це можливо здійснити, тому що у вихідних газах ГТУ міститься 15 – 17,5 % O₂. Стехіометричний розрахунок показав, що кількість повітря, необхідного для горіння природного газу наприклад Кегичівського родовища при роботі ГТУ становить 162 кг/с. З урахуванням зниження рівня кисню при його вигоранні в КЗ ГТУ з 21 % до 17,5 % виникає необхідність в підвищенні його витрати до 175 кг/с, що практично дорівнює витраті відхідного газу з ГТЕ-60 173,4 кг/с. Теплота, що підводиться в енергетичний котел з димовими газами ГТУ, з урахуванням того, що вони охолоджуються до 300 °С, становить 44 МВт. У цьому випадку електричний ККД комбінованої установки складе 41 % в конденсаційному режимі.

Теплова потужність відхідних з енергетичного котла газів при їх охолодженні від температури 300 °С до 120 °С становить 36 МВт і може використовуватися на підігрів мережної води або

заміщення регенерації низького тиску. Так заміщення регенерації з 4 по 7 відбір (див. рис. 4) призводить до підвищення електричного ККД в конденсаційному режимі до 42,6 %.

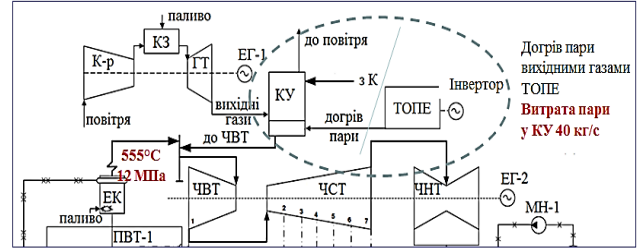


Рис. 7 – Схема паралельного підключення ГТУ до ПТУ з допалюванням газу у КУ та ТОПЕ (схема В)

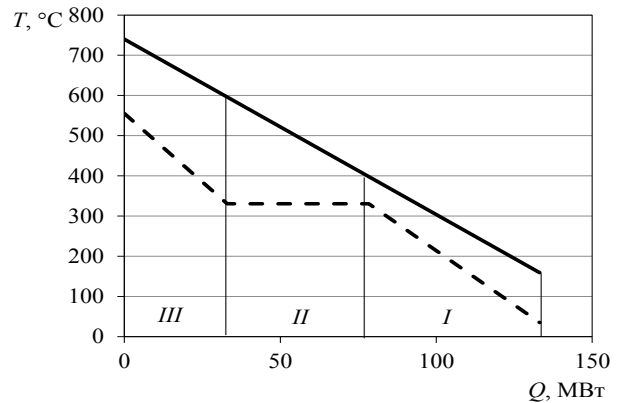


Рис. 8 – Діаграма передачі теплоти в КУ (схема В) (підпис див. рис. 5)

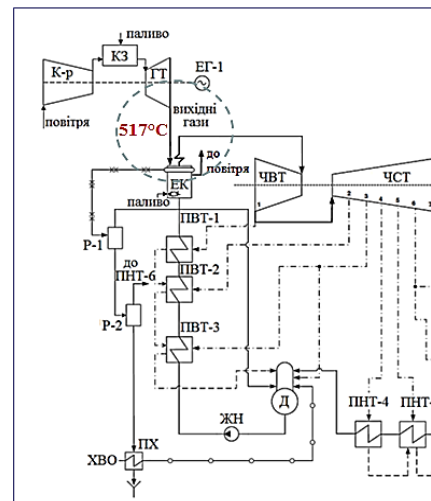


Рис. 9 – Скидна схема підключення ГТУ до ПТУ (схема Г) (підписи див. рис. 1)

Якщо ж в комбіновану установку скидного типу включити збірку з ТОПЕ сумарною електричною потужністю 20 МВт, то це дозволить підвищити

електричний ККД до 46 % в конденсаційному режимі (електрична потужність дорівнює 190 МВт). Таке підвищення ККД досягається за рахунок повного заміщення регенерації шляхом утилізації теплоти відхідних газів з паливних елементів і димових газів енергетичного котла (заміщення ПВД та ПНД) (рис. 10).

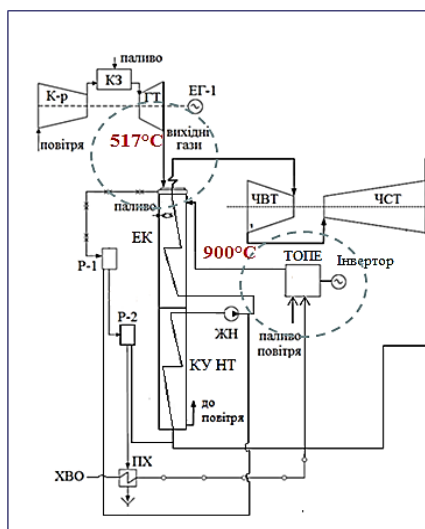


Рис. 10 – Скидна схема підключення ГТУ до ПТУ з ТОПЕ та заміщенням регенерації (схема Д) (підписи див. рис. 1)

На рис. 11 показано підвищення електричного ККД розглянутих варіантів схем підключення ГТУ до ПТУ η_e відносно ККД базової енергоустановки ТЕЦ $\eta_e^{ПТУ}$ у конденсаційному режимі.

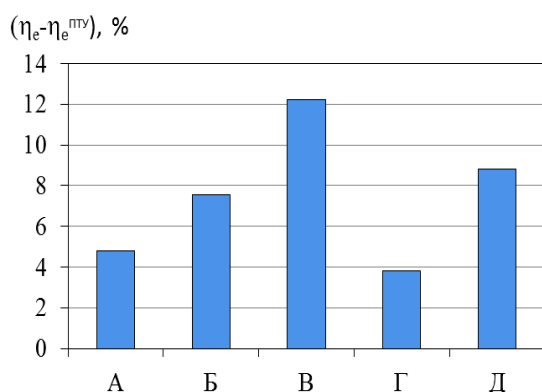


Рис. 11 – Підвищення електричного ККД різних варіантів схем підключення ГТУ до ПТУ (А, Б, В, Г, Д) відносно ККД базової енергоустановки ТЕЦ

Найбільше підвищення електричного ККД на 12 % порівняно з ПТУ досягається у схемі В при паралельному підключенні ГТУ до ПТУ з допалюванням газу у КУ та ТОПЕ.

Обговорення результатів

У роботі розглянуто шляхи комплексної модернізації теплоелектростанцій на прикладі енергоблоків ТЕЦ-5 м. Харкова з паротурбінними установками Т-110/120-130. Як надбудову запропоновано використовувати газотурбінну установку ГТЕ-60 потужністю 60 МВт, що виробляється на підприємстві ДП НВКГ «Зоря-Машпроект», м. Миколаїв. З метою підвищення ефективності використання природного газу у комбінованих парогазових установках розглянуто застосування технологій з електрохімічними енергоперетворювачами. А саме, запропоновано включення у парогазову схему «Т-110/120-130 – ГТЕ-60» високотемпературного електрохімічного генератора, який скомпоновано у єдину модульну установку із 40 трубчастих твердооксидних паливних елементів (ТОПЕ) потужністю 500 кВт. Такий підхід до модернізації показав хороші результати з підвищення ефективності роботи теплоелектростанції. Однак, для більш коректного вибору схеми необхідно доповнити метод докладним термoeкономічним та еколого-ексергетичним аналізом [15,16].

Висновки

Запропоновано концептуальні рішення використання газотурбінного циклу та технології твердооксидних паливних елементів як надбудови до існуючих потужних паротурбінних установок для підвищення ефективності та екологічності їх роботи.

Проведено порівняльний енергетичний аналіз різних варіантів комбінованих схемних рішень щодо модернізації діючого енергоблоку ТЕЦ-5 м. Харкова, який показав, що найбільше підвищення електричного ККД на 12 % в порівнянні з діючою паровою турбіною Т-100/120-130 досягається в схемі паралельного підключення ГТУ ГТЕ-60 до неї з допалюванням газу у КУ та ТОПЕ сумарної потужності 20 МВт.

Список літератури

1. Basu S., Debnath A. K. *Power plant instrumentation and control handbook. A guide to thermal power plants. 2nd ed.* Academic Press, 2019. 1152 p.
2. Rai A. K., Pandey M., Baredar P. Super critical thermal power plant boiler efficiency calculation using imported coal. *Int. J. for Research in Appl. Science & Eng. Technology.* 2017. Vol. 5. Iss. IX. P. 709–717. doi: 10.22214/IJRASET.2017.9104.
3. *Парові турбіни Siemens Energy.* URL: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offersings/power-generation/steam-turbines/steam-turbines-in-combined-cycle-power-plants.html> (дата звернення: 30.11.2022).
4. Leo T. J., Perez-Grande I., Perez-del-Notario P. Gas turbine turbocharged by a steam turbine: a gas turbine solution

- increasing combined power plant efficiency and power. *Appl. Therm. Eng.* 2003. Vol. 23. Iss. 15. P. 1913–1929. doi: 10.1016/S1359-4311(03)00144-3.
- Халатов А. А., Карп И. Н., Куцан Ю. Г. Энергетическое газотурбостроение: перспективы использования в энергетике Украины. *Вісник НАН України*. 2015. № 11. С. 52–58. doi: 10.15407/vism2015.11.052.
 - Халатов А. А. Парогазові установки в енергетиці: сучасний стан і перспективи розвитку в Україні. *Научные и прикладные вопросы промышленного газотурбостроения (сборник опубликованных статей)*. Київ: ИТТФ НАН Украины, 2014. Т. 1. С. 41–52.
 - Леонтьев Р. А., Рассохин В. А. Основные пути повышения экономичности газопаровых установок. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*. 2012. № 2, Ч. 2. С. 40–47.
 - Романов В. В., Раимов Р. И., Черный Г. В. Новые газотурбинные установки мощностью 45 и 60 МВт разработки ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» и высокоэффективные энергетические установки на их основе в энергетике Украины. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2008. № 2. С. 155–161.
 - Двигуни ДП НВКГ «Зоря-Машпроект»*. URL: <https://zmturbines.com/serial-production/engines> (дата звернення: 07.07.2022).
 - Sharaf O. Z., Orhan M. F. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2014. Vol. 32. P. 810–853. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.012.
 - Welaya Y. M. A., Mosleh M., Ammar N. R. Thermodynamic analysis of a combined gas turbine power plant with a solid oxide fuel cell for marine applications. *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.* 2013. Vol. 5, Iss. 4. P. 529–545. doi: 10.2478/IJNAOE-2013-0151.
 - Cheddie D. F. Integration of A Solid Oxide Fuel Cell into A 10 MW Gas Turbine Power Plant. *Energies*. 2010. Vol. 3, Iss. 4. P. 754–769. doi: 10.3390/en3040754.
 - ПАТ «Харківська ТЕЦ-5: офіційний сайт*. URL: <https://www.tec5.kharkov.ua/eng/index.php> (дата звернення: 30.11.2022).
 - Rusanov A. V., Kostikov A. O., Shubenko O. L., Kharlampidi D. Kh., Tarasova V. O., Senetskyi O. V. Highly efficient cogeneration power plant with deep regeneration based on air Braiton cycle. *J. Mech. Eng.* 2019. Vol. 22, No. 4. P. 12–23. doi: 10.15407/pmach2019.04.012.
 - Tarasova V., Kuznetsov M., Ganzha M., Litvinenko M. Optimization of the thermodynamic cycle of a combined-cycle power plant. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week). Proceedings of the conference (September 13-17, 2021, Kharkiv, Ukraine)*. IEEE. 2021. P. 208–212. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570103.
 - Kostikov A., Tarasova V., Kuznetsov M., Satayev M., Kharlampidi D. Thermoeconomical optimization of a regenerative air turbine cogeneration system. *J. Therm. Eng.* 2021. Vol. 7, No. 7. P. 1719–1730. doi: 10.18186/thermal.1025958.
 - Rai A. K., Pandey M., Baredar P. Super critical thermal power plant boiler efficiency calculation using imported coal. *Int. J. for Research in Appl. Science & Eng. Technology*, 2017, vol. 5 (9), pp. 709–717, doi: 10.22214/IJRASET.2017.9104.
 - Siemens Energy Steam Turbines*. Available at: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offersings/power-generation/steam-turbines/steam-turbines-in-combined-cycle-power-plants.html> (accessed 30.11.2022).
 - Leo T. J., Perez-Grande I., Perez-del-Notario P. Gas turbine turbocharged by a steam turbine: a gas turbine solution increasing combined power plant efficiency and power. *Appl. Therm. Eng.*, 2003, Vol. 23 (15), pp. 1913–1929, doi: 10.1016/S1359-4311(03)00144-3.
 - Khalatov A. A., Karp I. N., Kutsan Yu. G. Energeticheskoye gazoturbostroyeniye: perspektivy ispolzovaniya v energetike Ukrainy [Energy gas turbine construction: prospects for use in the energy sector of Ukraine]. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.*, 2015, no. 11, pp. 52–58, doi: 10.15407/vism2015.11.052.
 - Khalatov A. A. Parohazovi ustanovky v enerhetytsi: suchasnyy stan i perspektyvy rozvytku v Ukrayini [Steam and gas plants in the energy industry: current state and development prospects in Ukraine]. *Nauchnyye i prikladnyye voprosy promyshlennogo gazoturbostroyeniya (collection of published articles)*. Kyiv. ITTF NAS of Ukraine, 2014, Vol. 1, pp. 41–52.
 - Leontyev R. A., Rassokhin V. A. Osnovnyye puti povysheniya ekonomichnosti gazoparovykh ustanovok [The main ways to increase the efficiency of gas-steam plants]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovaniye*, 2012, no. 2 (2), pp. 40–47.
 - Romanov V. V., Raimov R. I., Chernyy G. V. Novyye gazoturbinnyye ustanovki moshchnostyu 45 i 60 MW razrabotki GP NPKG «Zorya-Mashproyekt» i vysokoeffektivnyye energeticheskiye ustanovki na ikh osnove v energetike Ukrainy [New gas turbine units with a capacity of 45 and 60 MW developed by SE "Zorya-Mashproekt" and highly efficient power plants based on them in the energy sector of Ukraine]. *Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya*, 2008, no. 2, pp. 155–161.
 - Engines of State Enterprise "Zorya-Mashproekt"*. Available at: <https://zmturbines.com/serial-production/engines> (accessed 07.07.2022).
 - Sharaf O. Z., Orhan M. F. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2014, Vol. 32, pp. 810–853, doi: 10.1016/j.rser.2014.01.012.
 - Welaya Y. M. A., Mosleh M., Ammar N. R. Thermodynamic analysis of a combined gas turbine power plant with a solid oxide fuel cell for marine applications. *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, 2013, Vol. 5 (4), pp. 529–545, doi: 10.2478/IJNAOE-2013-0151.
 - Cheddie D. F. Integration of A Solid Oxide Fuel Cell into A 10 MW Gas Turbine Power Plant. *Energies*, 2010, vol. 3 (4), pp. 754–769, doi: 10.3390/en3040754.
 - Kharkiv Combined Heat and Power Plant No 5: official site*. Available at: <https://www.tec5.kharkov.ua/eng/index.php> (accessed 30.11.2022).
 - Rusanov A. V., Kostikov A. O., Shubenko O. L., Kharlampidi D. Kh., Tarasova V. O., Senetskyi O. V. Highly efficient cogeneration power plant with deep regeneration based on air Braiton cycle. *J. Mech. Eng.*, 2019, vol. 22 (4), pp. 12–23, doi: 10.15407/pmach2019.04.012.

References (transliterated)

- Basu S., Debnath A. K. *Power plant instrumentation and control handbook. A guide to thermal power plants. 2nd ed.* Academic Press, 2019, 1152 p.

15. Tarasova V., Kuznetsov M., Ganzha M., Litvinenko M. Optimization of the thermodynamic cycle of a combined-cycle power plant. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week). Proceedings of the conference (September 13-17, 2021, Kharkiv, Ukraine)*. IEEE, 2021, pp. 208–212, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570103.
16. Kostikov A., Tarasova V., Kuznetsov M., Satayev M., Kharlampidi D. Thermoeconomical optimization of a regenerative air turbine cogeneration system. *J. Therm. Eng.*, 2021, Vol. 7 (7), pp. 1719–1730, doi: 10.18186/thermal.1025958.

Відомості про авторів (About authors)

Костіков Андрій Олександрович – чл.-кор. Національної академії наук України, доктор технічних наук, заступник директора з наукової роботи Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6076-1942>; e-mail: kostikov@ipmach.kharkov.ua.

Андрій Костіков – Corresponding member of National Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Research of A. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of National Academy of Science of Ukraine, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6076-1942>; e-mail: kostikov@ipmach.kharkov.ua.

Тарасова Вікторія Олександрівна – доктор технічних наук, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, провідний науковий співробітник відділу моделювання та ідентифікації теплових процесів в енерготехнологічному обладнанні; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3252-7619>; e-mail: vat523710@gmail.com.

Victoria Tarasova – Doctor of Technical Sciences, A. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of National Academy of Science of Ukraine, Leading Researcher of Department of Modeling and Identification of Thermal Processes in Power Engineering Equipment, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3252-7619>; e-mail: vat523710@gmail.com.

Кузнецов Михайло Олександрович – кандидат технічних наук, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, науковий співробітник відділу моделювання та ідентифікації теплових процесів в енерготехнологічному обладнанні; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5180-8830>; e-mail: childeric1975@gmail.com.

Mikhail Kuznetsov – PhD, A. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of National Academy of Science of Ukraine, Researcher of Department of Modeling and Identification of Thermal Processes in Power Engineering Equipment, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5180-8830>; e-mail: childeric1975@gmail.com.

Ганжа Микола Григорович – Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, провідний інженер відділу моделювання та ідентифікації теплових процесів в енерготехнологічному обладнанні; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3625-6131>; e-mail: nk7007@ukr.net.

Mykola Ganzha – A. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of National Academy of Science of Ukraine, Leading Engineer of Department of Modeling and Identification of Thermal Processes in Power Engineering Equipment, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3625-6131>; e-mail: nk7007@ukr.net.

Мазур Андрій Олександрович – Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, аспірант відділу моделювання та ідентифікації теплових процесів в енерготехнологічному обладнанні; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2864-4943>; e-mail: drussmazur@gmail.com.

Andrii Mazur – A. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of National Academy of Science of Ukraine, Postgraduate Student of Department of Modeling and Identification of Thermal Processes in Power Engineering Equipment, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2864-4943>; e-mail: drussmazur@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Костіков А. О., Тарасова В. О., Кузнецов М. О., Ганжа М. Г., Мазур А. О. Оцінка ефективності парогазових установок з інтеграцією твердооксидних паливних елементів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 3-10. doi:10.20998/2413-4295.2022.04.01.

Please cite this article as:

Kostikov A., Tarasova V., Kuznetsov M., Ganzha M., Mazur A. Efficiency evaluation of steam-gas plants with the solid oxide fuel cells integration. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4 (14), pp. 3–10, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.01.

Надійшла (received) 01.12.2022

УДК 621.314

doi:10.20998/2413-4295.2022.04.02

ПАРАМЕТРИЧНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТРИФАЗНИМ АКТИВНИМ ВИПРЯМЛЯЧЕМ З ФІКСОВАНОЮ ЧАСТОТОЮ МОДУЛЯЦІЇ

Д. С. КРИЛОВ*, О. І. ХОЛОД

кафедра промислової і біомедичної електроніки, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: denis.krylov@khp.edu.ua

АНОТАЦІЯ Дослідження характеристик активних керованих випрямлячів – джерел напруги (АВДН) нерозривно пов'язане з питанням використання у них того чи іншого алгоритму керування ключами. Відомо, що вони поділяються на дві основні групи – алгоритми зі змінною і з фіксованою частотою модуляції. Кожен з них має свої переваги і недоліки, привносячи особливості як до розрахунку параметрів силової схеми перетворювача, так і у вибір структури системи керування та авторегулювання. Алгоритми керування з фіксованою частотою модуляції мають відчутні переваги, що спрощують тепловий розрахунок елементів схеми і вхідних фільтрів перетворювача. На практиці, найчастіше, необхідно підтримувати кут зсуву між струмом і напругою мережі живлення рівний 0, або, в режимі рекуперації енергії рівний 180 електричним градусам. З цим завданням добре справляються параметричні системи керування. Тому розглянуто створення і моделювання структури параметричної системи керування АВДН з фіксованою частотою модуляції, що дозволяє формувати близький до синусоїди струм мережі живлення з нульовим фазовим зсувом щодо напруги мережі в широкому діапазоні зміни параметрів схеми і споживаної нею потужності. У роботі розглянуто: фізичні передумови функціонування запропонованого авторами алгоритму роботи системи керування, яка побудована на принципі формування сигналу керування PWM генератора зі складових напруг вхідного ланцюга схеми з фазовою корекцією кута зсуву першої гармоніки струму мережі щодо напруги живлення; принципи формування сигналів, що діють всередині неї; побудовано залежності, що обґрунтовують необхідність застосування запропонованих у статті технічних рішень. Результати моделювання показали, що АВДН, який працює із запропонованою системою керування, дозволяє підтримувати задане значення вихідної напруги і близький до синусоїди струм мережі живлення з нульовим фазовим зсувом відносно напруги живлення у широкому діапазоні зміни параметрів схеми і споживаної нею потужності.

Ключові слова: параметрична система керування; активний випрямляч; фіксована частота модуляції; фазовий зсув; векторна діаграма; широтно-імпульсна модуляція; фазова корекція.

PARAMETRIC CONTROL SYSTEM OF A THREE-PHASE ACTIVE RECTIFIER WITH A FIXED MODULATION FREQUENCY

D. KRYLOV*, O. KHOLOD

Department of industrial and biomedical electronics, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The study of the characteristics of active controlled rectifiers – voltage sources (ARVS) is inextricably connected with the issue of using one or another key management algorithm in them. It is known that they are divided into two main groups: algorithms with a variable and with a fixed modulation frequency. Each of them has its advantages and disadvantages, bringing features both to the calculation of the parameters of the power circuit of the converter, and to the choice of the structure of the control system and autoregulation. Control algorithms with a fixed modulation frequency have tangible advantages that simplify the thermal calculation of circuit elements and input filters of the converter. In practice, most often, it is necessary to maintain the offset angle between the current and the voltage of the power network equal to 0, or, in the energy recovery mode – 180 electrical degrees. Parametric control systems cope well with this task. Therefore, it was shown creation and modeling the structure of the parametric control system of the ARVS with a fixed modulation frequency, which allows to form a power network current close to a sinusoid with a zero phase shift with respect to the network voltage in a wide range of changes in the parameters of the circuit and the power consumed by it. The paper examines: the physical prerequisites for the operation of the control system algorithm proposed by the authors, which is built on the principle of generating a PWM generator control signal from the component voltages of the input circuit of the circuit with phase correction of the shift angle of the first harmonic of the network current relative to the supply voltage; principles of formation of signals operating within it; the dependencies justifying the need to apply the technical solutions proposed in the article are built. The simulation results showed that the ARVS, which works with the proposed control system, allows maintaining the specified value of the output voltage and the current close to the sinusoid of the power network with zero phase shift relative to the power supply voltage in a wide range of changes in the parameters of the circuit and the power consumed by it.

Keywords: parametric control system; active rectifier; fixed modulation frequency; phase shift; vector diagram; pulse width modulation; phase correction.

Вступ

Дослідження характеристик активних керованих випрямлячів – джерел напруги (АВДН) нерозривно пов'язане з питанням використання в них

того чи іншого алгоритму керування ключами. Із публікацій [1-4] відомо, що вони діляться на дві основні групи – алгоритми зі змінною і з фіксованою частотою модуляції. Кожен з них має свої переваги і недоліки, привносячи особливості як до розрахунку

параметрів силової схеми перетворювача, так і у вибір структури системи керування та авторегулювання. На думку авторів, алгоритми керування з фіксованою частотою модуляції мають відчутні переваги, що спрощують тепловий розрахунок елементів схеми і вхідних фільтрів перетворювача. У роботах [5,6] авторами було проаналізовано вплив вхідної індуктивності на якісні показники роботи АВДН з фіксованою частотою модуляції та запропоновано алгоритм вибору її величини, а також запропоновано методику розрахунку параметрів вхідного фільтра. У дослідженнях [3,7] запропоновані та промодельовані різні структури систем керування АВДН з фіксованою частотою модуляції, засновані, перш за все, на теорії представлення струмів і напруг перетворювача у вигляді узагальнених векторів у різних системах координат. При формуванні сигналу завдання *PWM* генератора, векторні системи керування аналізують і обробляють складові узагальненого вектору струму фаз мережі живлення. Це дозволяє отримувати синусоїдальну форму і заданий кут зсуву струму мережі щодо напруги живлення, але ускладнює структуру системи керування і підвищує її вартість. При цьому на практиці, найчастіше, необхідно підтримувати кут зсуву між струмом і напругою мережі живлення рівний 0, або, в режимі рекуперації енергії, 180 електричним градусам. З цим завданням, як показано в роботі [8], добре справляються простіші і дешевші параметричні системи керування. Однак їх структури розглядають, найчастіше [1,2,4], стосовно систем керування з гістерезисним виходом зі змінною частотою модуляції. У розглянутій авторами літературі докладного дослідження та моделювання параметричних систем керування АВДН, що працюють з фіксованою частотою модуляції в широкому діапазоні зміни параметрів силової схеми та її вихідної потужності виявлено не було.

Мета роботи

Метою даної роботи є створення і моделювання структури параметричної системи керування АВДН з фіксованою частотою модуляції, що дозволяє формувати близький до синусоїди струм мережі живлення з нульовим фазовим зсувом щодо напруги мережі в широкому діапазоні зміни параметрів схеми і споживаної нею потужності.

Виклад основного матеріалу

Фізика роботи силових ланцюгів однофазних і трифазних схем АВДН детально описана в публікаціях [1,2,4,9-11,13]. При аналізі взаємозв'язку струмів і напруг у цьому перетворювачі найчастіше розглядають однофазну мостову схему, як найбільш просту, проте не характерну для приводів змінного струму середньої потужності. У них найбільшого поширення набула трифазна мостова схема, виконана, як і однофазна, на ключах знакозмінного струму.

Спрощена структурна схема силових ланцюгів трифазної схеми АВДН наведена на рис. 1. Вона, у загальному випадку, складається з: трифазного джерела синусоїдальної змінної напруги мережі живлення, що характеризується миттєвими фазними напругами u_{Sa}, u_{Sb}, u_{Sc} ; вхідних індуктивностей схеми L_a, L_b, L_c , які підключені послідовно у фази мережі живлення на вході перетворювача *AR*, зібраного по трифазній мостовій схемі на ключах знакозмінного струму; конденсатора *C* у проміжній ланці постійного струму, що характеризується вихідним струмом i_d та напругою u_d перетворювача; навантаження *Load*, якою, як правило, є автономний інвертор напруги (АІН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

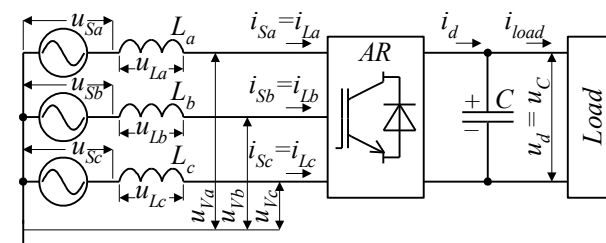


Рис. 1 – Структурна схема силових ланцюгів АВДН

В процесі роботи АВДН періодично підключає до фаз мережі живлення напругу конденсатора ланки постійного струму $u_C = u_d$ з різною полярністю, що формує щодо нульового виводу джерела живлення фазні напруги u_{Va}, u_{Vb}, u_{Vc} на його вході. У результаті на періоді модуляції змінюється динаміка струму фаз джерела i_a, i_b, i_c , що протікає через вхідні індуктивності, та падіння напруги на самих індуктивностях u_{La}, u_{Lb}, u_{Lc} . Це дозволяє сформувати необхідну форму та фазу струму джерела живлення.

З теорії роботи трифазної схеми АВДН [1,2,4,11-13], структурна схема силових ланцюгів якої приведена на рис. 1, відомо, що фізика процесів, що протікають у кожній з її фаз, збігається з такою, що характерна і для однофазної схеми. Тобто для схеми рис. 1 будуть справедливі співвідношення, отримані для однофазної схеми, стосовно струмів і напруг у кожній з фаз. Тому надалі, розглядаючи принцип формування сигналів у параметричній системі керування трифазним АВДН, будемо вести мову про струми і напруги лише в одній фазі вхідного ланцюга схеми. Робота решти фаз буде аналогічною, зі зсувом на 120 електричних градусів.

У цьому випадку розглянуті вище напруги у фазі вхідного контуру АВДН за законом Кірхгофа в будь-який момент часу будуть пов'язані між собою виразом:

$$u_S = u_L + u_V \quad (1)$$

Миттєве значення струму фази АВДН, який протікає і через вхідний дросель, формується під дією падіння напруги на дроселі u_L , що змінюється з частотою модуляції. Припустивши, що напруга джерела живлення u_S синусоїдальна і незмінна за частотою, фазою і діючим значенням, формувати необхідну форму напруги на вхідному дроселі L , згідно (1), можна, якщо формувати необхідну форму миттєвої напруги на вході АВДН u_V . Таким чином, миттєвий струм фази мережі живлення $i_S = i_L$ формується під дією миттєвої напруги на вході АВДН u_V . Відповідно, амплітуда та фаза першої гармоніки струму мережі $i_{S(1)}$ визначатиметься амплітудою та фазою першої гармоніки фазної напруги на вході АВДН $u_{V(1)}$.

В основі роботи систем керування перетворювачами з широтно-імпульсною модуляцією зазвичай лежить принцип порівняння змінного за величиною сигналу керування з опорною напругою – періодичним сигналом з фіксованою амплітудою та частотою. Частота опорної напруги визначає частоту модуляції, а її амплітуда – можливий діапазон зміни напруги керування. При коректній побудові *PWM* генератора вихідна напруга перетворювача повторює своєю першою гармонікою напругу керування, що формується системою керування, з деяким заданим коефіцієнтом передачі.

Стосовно перетворювача, який розглядається при роботі з фіксованою частотою модуляції, це означає, що для формування необхідної амплітуди і фази першої гармоніки струму мережі потрібно сформувати необхідну форму і фазу першої гармоніки вхідної напруги АВДН, для чого сформувати відповідну йому форму і фазу напруги керування на вході *PWM* генератора системи керування.

На практиці, перед АВДН найчастіше стоїть завдання формування максимально близького за формою до синусоїди струму мережі живлення, що знаходиться у фазі з напругою джерела живлення. Або в протифазі до нього в режимі рекуперації енергії. Тому подальший розгляд принципу побудови системи керування АВДН продовжимо з урахуванням лише перших, що змінюються з частотою мережі живлення, гармонік струмів і напруг у вхідному ланцюзі перетворювача. Тоді від виразу (1) можна перейти до векторної суми у вигляді:

$$\bar{U}_S = \bar{U}_{L(1)} + \bar{U}_{V(1)}, \quad (2)$$

де $\bar{U}_S = U_S \cdot e^{j\omega}$ – вектор першої гармоніки фазної напруги джерела живлення; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_S$ – кругова частота мережі живлення; $\bar{U}_{V(1)}$ – вектор першої гармоніки напруги на вході АВДН; $\bar{U}_{L(1)} = j \cdot \omega \cdot L \cdot \bar{I}_{S(1)}$ – вектор першої гармоніки падіння напруги на вхідному дроселі АВДН; $\bar{I}_{S(1)}$ –

вектор першої гармоніки струму мережі, зрушений, в загальному випадку, від вектора першої гармоніки фазної напруги мережі на кут φ .

У режимі передачі енергії від джерела в навантаження при повній компенсації реактивної потужності кут зсуву φ буде дорівнювати нулю і вектори перших гармонік струму мережі $\bar{I}_{S(1)}$ та напруги мережі \bar{U}_S будуть співспрямовані. Тоді вектор першої гармоніки падіння напруги на вхідному дроселі АВДН $\bar{U}_{L(1)}$ буде зрушений щодо вектора $\bar{I}_{S(1)}$ на 90 електричних градусів у бік випередження. При цьому, згідно (2), вектор першої гармоніки напруги на вході АВДН $\bar{U}_{V(1)}$ можна визначити як векторну різницю

$$\bar{U}_{V(1)} = \bar{U}_S - \bar{U}_{L(1)}. \quad (3)$$

В режимі $\varphi = 0$ він буде зрушений щодо вектора \bar{U}_S на кут θ та більший його по модулю. Векторна діаграма напруг і струмів у вхідному ланцюзі АВДН, що працює в режимі повної компенсації реактивної потужності при передачі енергії від джерела в навантаження, наведена на рис. 2.

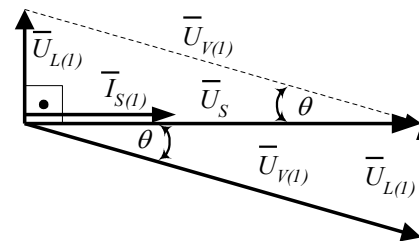


Рис. 2 – Векторна діаграма напруг та струмів у вхідному ланцюзі АВДН в режимі $\varphi = 0$

Струм мережі АВДН, що протікає через вхідний дросель і викликає на ньому падіння напруги, повинен не тільки передавати енергію з джерела в навантаження, але і забезпечувати підтримку на конденсаторі ланки постійного струму рівня напруги, що перевищує амплітуду напруги джерела живлення. Для реалізації цього в системі керування з синусоїдальною ШІМ і фіксованою частотою модуляції необхідно подавати на вхід *PWM* генератора сигнал керування, пропорційний по амплітуді і фазі першій гармоніці вхідної напруги АВДН. Враховуючи, що напруга джерела живлення синусоїдальна і незмінна за величиною, сформувати такий сигнал у системі керування можна, згідно (3) і рис. 2, якщо задати величину і фазу сигналу, пропорційного першій гармоніці падіння напруги на вхідному дроселі фази АВДН.

Структурна схема параметричної системи керування АВДН, що працює в режимі синусоїдальної ШІМ з фіксованою частотою модуляції, наведена на рис. 3.

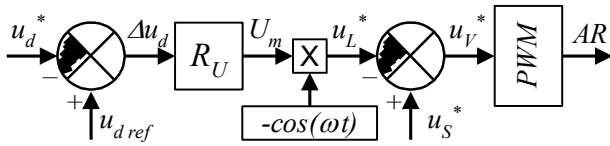


Рис. 3 – Структурна схема системи керування

Сигнал завдання напруги ланки постійного струму $u_{d\ ref}$ порівнюється з відносним поточним значенням напруги на конденсаторі u_d^* . Отриманий сигнал різниці Δu_d надходить як завдання на вхід регулятора вихідної напруги АВДН R_U , який формує сигнал завдання відносної амплітуди першої гармоніки напруги вхідного дроселя U_m . Для отримання поточного миттєвого значення сигналу згідно рис. 2, U_m необхідно домножити на функцію косинуса, отримавши напругу u_L^* , що випереджає струм мережі на 90 електричних градусів. Відносно значення сигналу керування PWM генератора u_V^* , згідно (3), отримуємо, віднімаючи з відносної фазної напруги джерела u_s^* відносне падіння напруги на вхідному дроселі u_L^* .

Для отримання відносних величин струмів і напруг у схемі для вхідного ланцюга АВДН в якості базових приймаємо амплітудні значення фазного струму та напруги, а для вихідного – амплітуду лінійної напруги джерела живлення.

Таким чином, регулюючи величину падіння напруги на вхідному дроселі, ми задаємо необхідне значення струму мережі, який протікає через нього та необхідний для підтримки заданої напруги на вихідному конденсаторі АВДН. Вона, згідно з теорією роботи схеми, має перевищувати амплітуду лінійної напруги на вході мінімум на 15% для стійкої роботи перетворювача. На практиці приймають значення $u_{d\ ref}$ у діапазоні 1.2–1.5 і намагаються знижувати вихідну напругу АВДН для зменшення втрат у схемі.

Обговорення результатів

На рис. 4 наведено математичну модель перетворювача, що відповідає структурі рис. 1. Вона виконана в інтерактивному середовищі Matlab/Simulink.

Параметри моделі прийняті такими ж, як і в попередніх дослідженнях, що проводилися авторами на цю тематику [3,5,8]: джерело трифазної змінної напруги з потужністю короткого замикання 150 МВА і рівнем лінійної напруги 0.4 кВ на вході перетворювача; ємність ланки постійного струму 28 мкФ; мостова схема АВДН, що працює в режимі синусоїдальної ШІМ з частотою модуляції 4 кГц; навантаженням є трифазний автономний інвертор напруги з синусоїдальною ШІМ, система керування якого підтримує в еквівалентному RL -навантаженні

виділення активної потужності на рівні 315 кВт в номінальному режимі роботи схеми. Величина вхідної індуктивності фази, згідно [5], може лежати в діапазоні від 100 до 600 мкГн, забезпечуючи коректну роботу перетворювача.

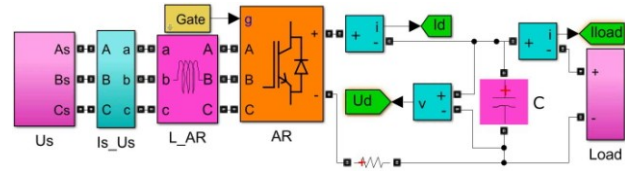


Рис. 4 – Matlab модель силових ланцюгів АВДН

Математичне моделювання показало працездатність запропонованого алгоритму формування сигналу керування PWM генератора u_V^* , що дозволяє впевнено підтримувати задане значення напруги на виході перетворювача і формувати синусоїдальний струм фази мережі живлення у всіх режимах роботи схеми. Однак і виявило його суттєвий недолік – нездатність підтримувати нульовий фазовий зсув між першими гармоніками напруги і струму фази джерела при зміні параметрів схеми і потужності, яку споживає навантаження.

На рис. 5-7 наведено залежності кута зсуву φ першої гармоніки струму мережі щодо фазної напруги мережі живлення при зміні індуктивності вхідного дроселя і потужності навантаження вниз від номінальної, а також зміні завдання за величиною вихідної напруги $u_{d\ ref}$ вище номінальної величини $u_{d\ refn} = 1.2$.

Дійсно, векторна діаграма рис. 2, покладена в основу структури рис. 3, побудована з припущенням, що перші гармоніки струму і падіння напруги вхідного дроселя зсунуті один щодо одного на 90 електричних градусів. Це може бути справедливо у номінальному режимі роботи схеми, що підтверджують залежності рис. 5–7. При зниженні вхідної індуктивності або потужності навантаження цей зсув зменшується і перша гармоніка струму мережі, що дорівнює першій гармоніці струму вхідного дроселя, починає випереджати фазну напругу джерела на кут φ тим більший, чим більше відхилення від номінальних параметрів системи.

Для усунення цього недоліку в системі керування, що працює відповідно до запропонованого алгоритму, можна реалізувати можливість розрахунку і завдання кута фазового зсуву між першими гармоніками струму і напруги дроселя в залежності від поточних параметрів роботи силової схеми. Це добре реалізується у структурах векторного керування. У параметричній системі керування, яка розглядається, найбільш доцільним на думку авторів рішенням є введення в структуру рис. 3 додаткового контуру корекції фазового зсуву між струмом і напругою джерела.

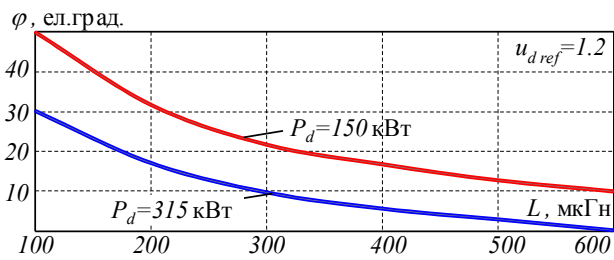


Рис. 5 – Залежність кута φ від індуктивності вхідного дроселя.

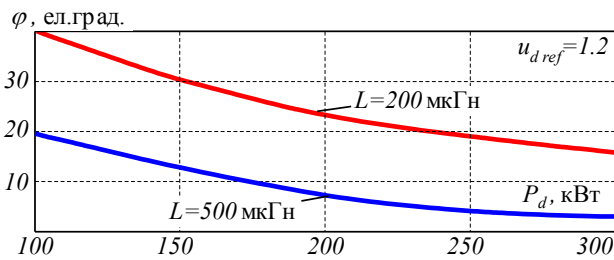


Рис. 6 – Залежність кута φ від потужності навантаження.

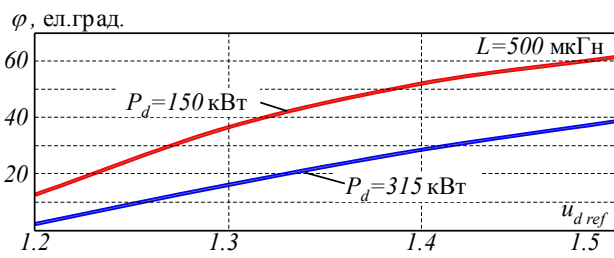


Рис. 7 – Залежність кута φ від завдання відносної величини вихідної напруги АВДН

Структурна схема удосконаленої параметричної системи керування наведена на рис. 8.

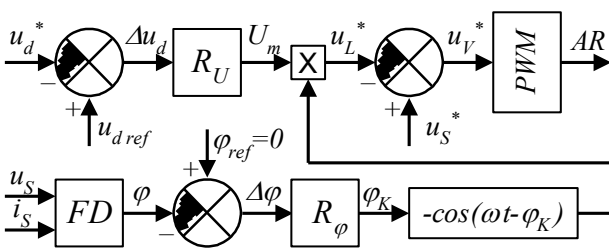


Рис. 8 – Система керування з фазовою корекцією

Миттєві значення струму мережі i_s та напруги u_s подаються на вхід фазового детектора FD , котрий формує сигнал, пропорційний куту зсуву між ними φ . Сигнал неузгодженості $\Delta\varphi$ отримують як різницю сигналу завдання кута зсуву φ_{ref} та поточного значення кута зсуву φ . Регулятор кута корекції фази R_φ , що діє в функції сигналу $\Delta\varphi$, формує кут корекції фази φ_K . Блок розрахунку функції косинуса використовує сигнал φ_K для

отримання необхідного фазового зсуву між струмом і падінням напруги на вхідному дроселі АВДН.

Значимо, що регулятор кута корекції фази R_φ має бути менш швидкодіючим, ніж регулятор вихідної напруги АВДН R_U , для зниження їхнього взаємного впливу один на одного під час перехідних процесів. Сигнал завдання φ_{ref} в режимі передачі енергії від джерела до навантаження зазвичай приймають рівним нулю, забезпечуючи близький до одиниці коефіцієнт потужності на вході перетворювача.

Зовнішній вигляд Matlab моделі системи керування, що повністю відповідає структурі рис. 8, наведено на рис. 9.

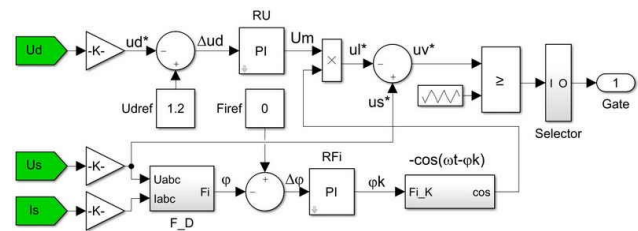


Рис. 9 – Matlab модель системи керування АВДН

Перевірка роботи моделі рис. 4 з системою керування рис. 9 показала здатність перетворювача підтримувати задане значення напруги на виході і формувати близький до синусоїди струм джерела, що має нульовий або інший заданий кут зсуву щодо фазної напруги у всьому діапазоні зміни параметрів схеми та потужності, яку споживає навантаження. Таким чином, введення в структуру рис. 3 блоку фазової корекції дозволило створити повністю функціональну параметричну систему керування АВДН, що працює з фіксованою частотою модуляції.

На рис. 10 та рис. 11 наведено машинограми, що ілюструють роботу вхідного ланцюга перетворювача з системою керування рис. 9 в режимі передачі енергії від джерела в навантаження при повній компенсації реактивної потужності. Машинограми на рис. 10 отримані для величини вхідної індуктивності фази АВДН 600 мкГн і активної потужності, що споживається навантаженням 300 кВт, а на рис. 11 – для величини вхідної індуктивності фази АВДН 200 мкГн і активної потужності, що споживається навантаженням 100 кВт. Таким чином машинограми рис. 10–11 ілюструють роботу перетворювача в широкому діапазоні зміни параметрів схеми і споживаної нею потужності.

З рис. 10 та рис. 11 видно, що перші гармоніки фазних струму і напруги не мають зсуву один щодо одного і знаходяться у фазі в обох режимах роботи, а взаємне положення і величина перших гармонік напруг у вхідному ланцюзі схеми відповідає описаній вище теорії роботи схеми.

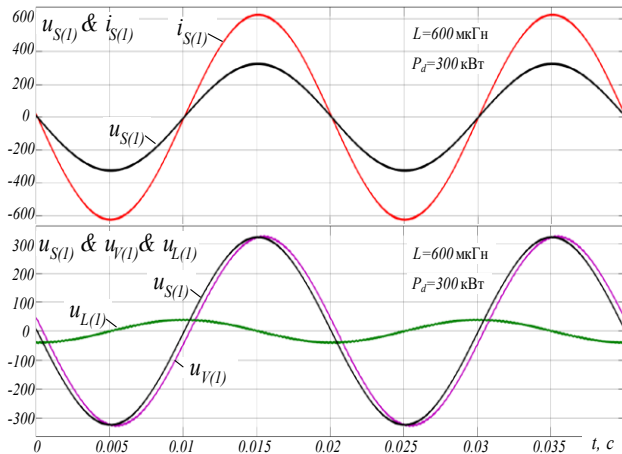


Рис. 10 – Машинограми роботи схеми при $L=600 \text{ мкГн}$ та $P_d=300 \text{ кВт}$

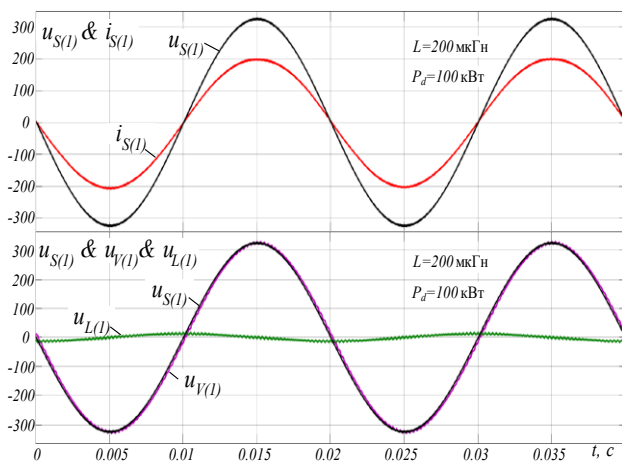


Рис. 11 – Машинограми роботи схеми при $L=200 \text{ мкГн}$ та $P_d=100 \text{ кВт}$

Висновки

У статті докладно розглянуті фізичні передумови функціонування запропонованого авторами алгоритму роботи параметричної системи керування АВДН з фіксованою частотою модуляції, принципи формування діючих усередині неї сигналів, побудовані залежності кута зсуву перших гармонік напруги і струму фази джерела живлення від параметрів силової схеми перетворювача та потужності, яку вона споживає, обґрунтовано застосування додаткового контуру корекції фазового зсуву. Математичне моделювання перетворювача з розробленою системою керування в об'єктно-орієнтованому програмному середовищі Matlab/Simulink дозволяє зробити такі висновки:

- схема АВДН може підтримувати задане значення вихідної напруги і близький до синусоїди струм мережі живлення з нульовим, або іншим заданим фазовим зсувом щодо напруги мережі в

широкому діапазоні зміни параметрів схеми і потужності, яку вона споживає;

- отримані машинограми дозволяють переконаватися в коректності роботи силової схеми та запропонованої системи керування, яка побудована на принципі формування сигналу керування *PWM* генератора зі складових напруг вхідного ланцюга схеми з фазовою корекцією кута зсуву першої гармоніки струму мережі щодо напруги живлення.

Список літератури

1. Wang, Y. *Analysis of three-phase rectifier via three different control methods and switch power loss comparison*. Mankato: Minnesota State University. 2021. 93 p.
2. Malinowski M. *Sensorless Control Strategies for Three - Phase PWM Rectifiers*. Warsaw: Warsaw University of Technology, 2001. 127 p.
3. Krylov D., Kholod O., Radohuz S. Active rectifier with different control system types, *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Istanbul, Turkey. 2020. P. 273–278. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263226.
4. Premkumar K., Kandasamy P., Vishnu Priya M., Thamizhselvan T., Ron Carter S. B. Three-phase rectifier control techniques: A comprehensive literature survey. *International Journal of Scientific and Technology Research*. 2020. Vol. 9. No 1. P. 3183–3188.
5. Крилов Д. С. Холод О. І. Вплив величини вхідної індуктивності на якісні показники роботи активного керованого випрямляча. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 18-23. doi: 10.20998/2413-4295.2021.01.03.
6. Krylov D. S., Kholod O. I. Determination of the input filter parameters of the active rectifier with a fixed modulation frequency. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2022. (4). P. 21–26. doi: 10.20998/2074-272X.2022.4.03.
7. Крилов Д. С., Холод О. І. Вдосконалення структури векторної системи керування активного керованого випрямляча. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 43–48. doi: 10.20998/2413-4295.2021.04.06.
8. Krylov D. S., Kholod O. I. The efficiency of the active controlled rectifier operation in the mains voltage distortion mode. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. No. 2. P. 30–35. doi: 10.20998/2074-272X.2021.2.05.
9. Song T., Zhang Y., Gao F., Zhu X., Shan J., Kong Z. Power Model Free Voltage Ripple Suppression Method of Three-Phase PWM Rectifier Under Unbalanced Grid. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2022. Vol. 37. No. 11. P. 13799-13807. doi: 10.1109/TPEL.2022.3184403.
10. Wai R.-J., Yang Y. Design of Backstepping Direct Power Control for Three-Phase PWM Rectifier. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019. Vol. 55. No. 3. P. 3160–3173. doi: 10.1109/TIA.2019.2893832.
11. He H., Si T., Sun L., Liu B., Li Z. Linear Active Disturbance Rejection Control for Three-Phase Voltage-Source PWM Rectifier. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 45050–45060. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978579.
12. Zhang C., Yu S., Ge X. A Stationary-Frame Current Vector Control Strategy for Single-Phase PWM Rectifier. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68. No. 3. P. 2640–2651. doi: 10.1109/TVT.2019.2895290.

13. Frisfelds K., Krievs O. Design of a Three-Phase Bidirectional PWM Rectifier with Simple Control Algorithm. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2019. Vol.56. No.3. P. 3–12. doi: 10.2478/lpts-2019-0015.

References (transliterated)

1. Wang Y. *Analysis of three-phase rectifier via three different control methods and switch power loss comparison*, Mankato: Minnesota State University, 2021, 93 p.
2. Malinowski M. *Sensorless Control Strategies for Three - Phase PWM Rectifiers*, Warsaw. Warsaw University of Technology, 2001. 127 p.
3. Krylov D., Kholod O., Radohuz S. Active rectifier with different control system types, *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2020, pp. 273–278, doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263226.
4. Premkumar K., Kandasamy P., Vishnu Priya M., Thamizhselvan T., Ron Carter S. B. Three-phase rectifier control techniques: A comprehensive literature survey. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 2020, Vol. 9, no 1, pp. 3183–3188.
5. Krylov D., Kholod O. The value influence of the input inductance on the qualitative indicators of the active rectifier operation. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, 1 (7), pp. 18–23, doi: 10.20998/2413-4295.2021.01.03.
6. Krylov D. S., Kholod O. I. Determination of the input filter parameters of the active rectifier with a fixed modulation frequency. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, (4), pp. 21–26, doi: 10.20998/2074-272X.2022.4.03.
7. Krylov D., Kholod O. Improving of the vector control system structure of the active controlled rectifier. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4(10), pp. 43–48, doi: 10.20998/2413-4295.2021.04.06.
8. Krylov D. S., Kholod O. I. The efficiency of the active controlled rectifier operation in the mains voltage distortion mode. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 2, pp. 30–35, doi: 10.20998/2074-272X.2021.2.05.
9. Song T., Zhang Y., Gao F., Zhu X., Shan J., Kong Z. Power Model Free Voltage Ripple Suppression Method of Three-Phase PWM Rectifier Under Unbalanced Grid, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, Vol. 37, no. 11, pp. 13799–13807, doi: 10.1109/TPEL.2022.3184403.
10. Wai R.-J., Yang Y. Design of Backstepping Direct Power Control for Three-Phase PWM Rectifier. In *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, Vol. 55, no. 3, pp. 3160–3173, doi: 10.1109/TIA.2019.2893832.
11. He H., Si T., Sun L., Liu B., Li Z. Linear Active Disturbance Rejection Control for Three-Phase Voltage-Source PWM Rectifier. *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 45050–45060, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978579.
12. Zhang C., Yu S., Ge X. A Stationary-Frame Current Vector Control Strategy for Single-Phase PWM Rectifier. In *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, Vol. 68, no. 3, pp. 2640–2651, doi: 10.1109/TVT.2019.2895290.
13. Frisfelds K., Krievs O. Design of a Three-Phase Bidirectional PWM Rectifier with Simple Control Algorithm. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2019, Vol. 56, no. 3, pp. 3–12, doi: 10.2478/lpts-2019-0015.

Відомості про авторів (About authors)

Крилов Денис Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової та біомедичної електроніки; м Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-1025-3939>; e-mail: denis.krylov@khi.edu.ua.

Denis Krylov – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-1025-3939>; e-mail: denis.krylov@khi.edu.ua.

Холод Ольга Ігорівна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри промислової та біомедичної електроніки; м Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-0036-0239>; e-mail: Olha.Kholod@khi.edu.ua.

Olga Kholod – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-0036-0239>; Olha.Kholod@khi.edu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Крилов Д. С., Холод О. І. Параметрична система керування трифазним активним випрямлячем з фіксованою частотою модуляції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 11-17. doi:10.20998/2413-4295.2022.04.02.

Please cite this article as:

Krylov D., Kholod O. Parametric control system of a three-phase active rectifier with a fixed modulation frequency. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4 (14), pp. 11–17, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.02.

Надійшла (received) 28.11.2022

УДК 004.55

doi:10.20998/2413-4295.2022.04.03

ОСОБЛИВОСТІ ТЕСТУВАННЯ ІНТЕРФЕЙСУ КОРИСТУВАЧА

І. М. ЄГОРОВА, К. В. ІЛЬЧЕНКО*

кафедра Медіасистем і технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: katelyna.ilchenko@nure.ua

АНОТАЦІЯ Сучасний розвиток інформаційних технологій суттєво впливає на формування попиту і зумовлює появу цифрових продуктів. Для успіху будь-якого цифрового продукту, що створюється, необхідно застосовувати підхід, орієнтований на користувача. Дослідження досвіду користувачів є ключовим компонентом такого підходу до розробки. UX research – це процес з'ясування того, як люди інтерпретують і використовують продукти та послуги. Галузь використання таких досліджень дуже широка: від веб-сайтів до мобільних телефонів, побутової електроніки, медичного обладнання, банківських послуг, тощо. В UX дизайні дослідження є фундаментальною частиною рішення відповідних проблем. На сьогодні, коли всі існуючі процеси значно прискорюються, користувачі швидко втрачають лояльність до продукту, адже вони знають, що існує безліч інших варіантів і без вагань шукають їх, тому невдалий досвід користувача з додатком, сайтом або продуктом в цілому може означати кінець взаємодії. UX дослідження є дуже корисними для розробки стратегії продукту і алгоритмізації рішень, які б відповідали потребам користувачів. Розглянуті питання оптимального вибору методів дослідження, як кількісних, так і якісних. Розглянуто як самі методи, такі як: метод інтерв'ю, фокус-груп, сортування карток, деревоподібне тестування, оцінка переваг, айтрекінг, перевірка концепції, A/B тестування, так і галузі їх застосування. Розглянуто переваги та недоліки методів, а також їх особливості. Використано метод аналізу ієрархії задля розрахунку критеріїв, таких як: ефективність, ціна, час та розмір вибірки. На основі проведеного аналізу встановлено, що найважливішим критерієм при виборі методу дослідження є його ефективність. Подальше обчислення зважених середніх оцінок для кожного варіанта рішення дозволило виявити найкращі методи дослідження та надати рекомендації щодо їх ефективного використання на різних етапах розробки цифрового продукту. Таким чином, оптимальний вибір методу тестування може суттєво покращити якість інтерфейсу користувача.

Ключові слова: UX; методи UX-дослідження; досвід користувача; тестування

PECULIARITIES OF UI TESTING

I. IEGOROVA, K. ILCHENKO

Department of Media Systems and Technologies, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The modern development of information technologies significantly affects the formation of demand and causes the appearance of digital products. For any digital product to be successful, a user-centric approach must be taken. User experience research is a key component of this development approach. UX research is the process of finding out how people interpret and use products and services. It is used everywhere from websites to mobile phones, consumer electronics, medical equipment, banking, and more. In UX design, research is a fundamental part of solving relevant problems. Today, when all existing processes are greatly accelerated, users quickly lose loyalty to a product, because they know that there are many other options and do not hesitate to look for them, so a bad user experience with an application, site or product in general can mean the end of the interaction. UX research is very useful for developing a product strategy and algorithmizing solutions that would meet the needs of users. The issues of optimal choice of research methods, both quantitative and qualitative are considered. Both the methods themselves, such as the interview method, focus groups, card sorting, tree testing, preference assessment, eyetracking, proof of concept, A/B testing, and their areas of application are examined. The advantages and disadvantages of the methods, as well as their features, are considered. The method of analyzing hierarchies to calculate criteria such as efficiency, price, time, and sample size was used. Based on the conducted analysis, it was established that the most important criterion when choosing a research method is its effectiveness. Further calculation of the weighted average scores for each decision option allowed to identify the best research methods and provide recommendations for their effective use at different stages of digital product development. Thus, the optimal choice of testing method can significantly improve the quality of the user interface.

Keywords: UX; UX research methods; user experience; testing

Вступ

Основним завданням при розробці будь-якого цифрового продукту є створення зручного користувальницького інтерфейсу [1]. Різниця між хорошим і поганим інтерфейсом найчастіше полягає в якості користувальницького досвіду (UX). Хороший UX – це зручна та приємна взаємодія користувача з додатком; це те, що відрізняє успішний продукт від невдалого [2].

Дизайн взаємодії з користувачем (UX) має три проблеми, що перетинаються: форма, поведінка та зміст. Дизайн взаємодії зосереджується на дизайні поведінки, але також підкріплюється тим, як ця поведінка пов'язана з формою та змістом [3].

Для побудови такого інтерфейсу необхідно розуміти, що являє собою UX і використовувати його при розробці UI. Дослідження користувачів – це систематичне вивчення цілей, потреб і можливостей користувачів з метою визначення проектування,

конструювання або вдосконалення інструментів, які допомагають користувачам працювати та жити [4].

Дослідники UX застосовують різні методи виявлення проблем і можливостей дизайну. При цьому вони розкривають цінну інформацію, яку можна використовувати у процесі проєктування. UX дизайн містить весь досвід, що отримує користувач під час взаємодії з продуктом [5].

Дослідження має бути безперервним процесом – до нього неодноразово повертаються протягом усього процесу розробки продукту [6]. Дослідження – це лише частина циклічного процесу проєктування. Його слід проводити протягом усього процесу проєктування. І в більшості випадків краще використовувати ітеративний підхід до дизайну, який складається з етапів, зображених на рис. 1.

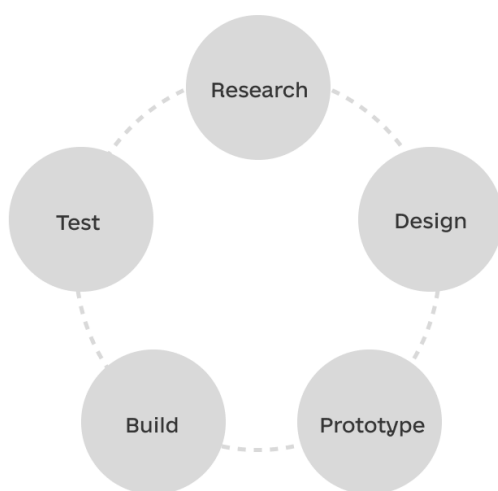


Рис. 1 – Модель життєвого циклу продукту

Важливо підкреслити, що цей процес є циклом, який необхідно постійно проходити. Проводячи дослідження користувачів, можна сформулювати проблему, спроектувати, створити прототип, побудувати його та, нарешті, повернутися до наших користувачів, щоб перевірити зроблені припущення.

Мета роботи

Метою даної статті є дослідження особливостей процесів тестування інтерфейсу користувача.

Дослідження UX

Дослідження UX можна розділити на дві підмножини: якісні дослідження та кількісні дослідження.

Якісне дослідження. Використовуючи такі методи, як інтерв'ю та етнографічні польові дослідження; дослідження, які дадуть змогу отримати глибоке розуміння того, чому користувачі роблять те, що вони роблять (наприклад, чому вони пропустили заклик до дії, чому вони ставляться до веб-сайту так, а не інакше, і так далі). Наприклад, можна проводити інтерв'ю з невеликою кількістю користувачів і ставити відкриті питання, щоб отримати особисте

уявлення про їхні звички до поведінки. При проведенні якісного дослідження, коли співпраця з учасниками дослідження є більш тісною, важливо подумати про пошук потрібних людей.

Кількісні дослідження. Використовуючи більш структуровані методи (наприклад, опитування, аналітику), можна зібрати вимірні дані про те, що роблять користувачі, та перевірити припущення, зроблені на основі якісних досліджень. Якщо наявна вибірка репрезентативних тестових користувачів є досить великою, то спосіб оцінки сукупності цільових користувачів буде статистично надійніший. Яким би не був метод, при ретельному дослідженні дизайну є можливість збирати об'єктивні дані, які не залежать від присутності дослідника, особистості або припущень [7].

При виборі методів дослідження важливо використовувати якісні та кількісні методи пліч-о-пліч, обидва мають своє місце. Якісні методи ведуть до інсайтів, а кількісні методи дозволяють перевірити ці ідеї [8].

В цілому наразі існує більше 20-ти видів методів UX-досліджень. Розглянемо деякі з них:

1.Інтерв'ю – чудовий спосіб дійсно зрозуміти суть потреб цільових користувачів. Дослідник зустрічається з учасниками віч-на-віч, щоб докладно обговорити те, що учасник думає по заданій темі. Цей метод використовується при плануванні редизайну або оновленні чинного рішення. Дозволяє оцінити сприйняття продукту та бренду, а також звернути увагу на основні технічні недоліки.

2.Метод фокус-груп. Група із 3-12 учасників під керівництвом модератора обговорює свої погляди на майбутній продукт. Роль модератора – швидше підтримувати потік думок, ніж спрямовувати його. Фокус-група може відповісти на кілька основних питань, але цей метод не повинен перетворюватися на інтерв'ю.

Зазвичай метод фокус груп застосовують на початку роботи над проєктом, щоб зрозуміти, чого користувачі чекають від кінцевого результату. Метод є ключовим для прийняття важливих стратегічних рішень та формування загальної концепції.

3.Сортування карток – це кількісний або якісний метод, при якому користувачам пропонується об'єднати елементи в групи та присвоїти категорії кожній групі. Спочатку робиться приблизний рисунок інформаційної архітектури, потім учасникам видаються комплекти карток з даними, які є на сайті або в додатку. Респондент повинен логічно розділити їх за смисловими групами. Останні у майбутньому можуть стати екранами інтерфейсу [10].

Сортування карток використовується на початковій стадії проєктування рішення, яке не має прямих аналогів на ринку. Дослідження також допоможе виявити недоліки у вже створеній інформаційній структурі [11].

4.Деревоподібне тестування (Tree Testing) - це кількісне дослідження, яке не передбачає участі продукту. Користувачі використовують текстову

версію сайту або додатку, структура якого зроблена у вигляді дерева. Завдання – знайти за наявною деревовидною схемою певний розділ у меню. Тест дозволяє зрозуміти, як структура може заплутати користувача. Тестування проводиться на стадії планування чи розробки.

5. Оцінка переваг: учасникам пропонуються різні варіанти візуального дизайну, і очікується, що вони дадуть оцінку кожному варіанту набором характеристик, вибраних із закритого списку, наприклад: швидкість, простота, корисність, передбачуваність, тощо. Доцільно проводити на ранніх стадіях розробки продукту.

6. Айттрекінг (Eyetracking). Спеціальний пристрій (айтрекер) відзначає точки фіксації погляду користувача під час роботи з сайтом або програмою, а також переходи між ними. Часто застосовуються моніторні айттрекери з інфрачервоним підсвічуванням, що відстежують відображення променів від очей за допомогою камери.

7. Перевірка концепції. Дослідник спілкується віч-на-віч з персоною або з великою кількістю учасників, особисто або онлайн; розповідає про товар або послугу, передаючи ключову суть (пропозицію з описом переваг) нової концепції або товару, щоб визначити, чи відповідає вона потребам цільової аудиторії. Метод використовується на етапі планування для підтвердження життєздатності концепції, перш ніж розвивати її у повноцінний продукт.

8. A/B тестування – це популярний метод порівняння двох версій сайту або додатку, що відрізняються одним або декількома елементами. Метод являє собою тестування різних варіантів дизайну сайту шляхом випадкового розподілу користувачів на групи. Кожна група взаємодіє з лише одним із варіантів дизайну. Ефект оцінюється залежно від поведінки користувачів. Метод використовується для оптимізації робочої версії продукту, або на останніх етапах розробки, або після публікації продукту [12].

Багато сучасних досліджень свідчать про важливість вдалого UX для підвищення ефективності роботи компанії. Наприклад, компанія PwC проводила дослідження "Experience is everything: Here's how to get it right" та виявила, що навіть якщо люди люблять компанію чи продукт, 59% користувачів підуть після кількох поганих подій, а 32% – відмовляться від улюбленого бренду за умови хоча б одного невдалого досвіду взаємодії з ним, а також, що клієнти готові платити більше за краще обслуговування.

Очевидно, що не завжди доцільно використовувати відразу всі згадані вище методи досліджень досвіду користувача на одному проекті, але проєкт точно виграє у разі застосування хоча б декількох методів і комбінування всіх інсайтів. У зв'язку з цим актуальним є питання вибору методу дослідження та галузі його застосування.

Оцінювати ряд методів досліджень можна по різним критеріям, наприклад: ціна, ефективність, кількість витраченого часу, розмір вибірки, тощо. В

такому випадку потрібно приймати рішення з урахуванням безлічі критеріїв.

У роботі було обрано метод аналізу ієрархій, істотною перевагою якого над більшістю існуючих методів оцінки альтернатив є чіткий опис суджень експертів та осіб, що приймають рішення, а також чітке уявлення структури проблеми: складових елементів проблеми і взаємозалежностей між ними.

Об'єм вибірки було розраховано за формулою:

$$n = \frac{Z^2 pq}{\Delta^2}, \quad (1)$$

де Z – коефіцієнт, залежний від обраного дослідником довірчого рівня, p – доля респондентів з наявністю досліджуваної ознаки, $q = 1 - p$ – доля респондентів, у яких досліджувана ознака відсутня, Δ – довірчий інтервал у десятковій формі. Об'єм вибірки склав 37 осіб.

Порядок здійснення розрахунків за МАІ зображений на рис 2.



Рис. 2 – Загальна схема розрахунків МАІ

Розглянуто модель структури ієрархій для вибору найкращої альтернативи (рис. 3).

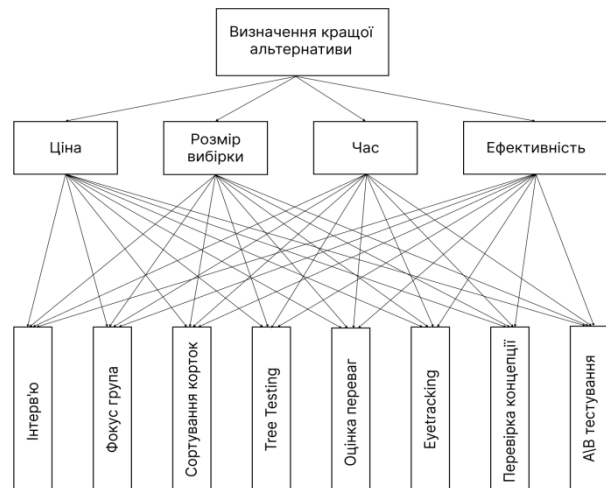


Рис. 3 – Модель структури ієрархії

Перший крок процедури МАІ полягає в попарному порівнянні методів за кожним критерієм. Для цього використовуємо стандартну шкалу порівняння: 1 – однакова перевага, 3 – помірна перевага, 5 – явна перевага, 7 – очевидна перевага, 9 – абсолютна перевага. Також можна присвоювати значення рейтингу 2, 4, 6 і 8, які визначаються як середнє від найближчих рейтингів. Після попарного порівняння матрицю необхідно нормалізувати, це виконується шляхом підсумовування чисел в кожному стовпці і подальшого поділу кожного елемента стовпця на отриману для даного стовпця суму. Завершивши нормалізацію матриці, необхідно обчислити коефіцієнт узгодженості і перевірити його значення.

Мета цієї операції полягає в тому, щоб переконатися в узгодженості завдання переваг у вихідній таблиці. В ідеальному випадку заходи узгодженості повинні бути рівні кількості можливих альтернативних рішень. Міра узгодженості

коливається від 8,00 до 8,15, що є гарним результатом.

Для обчислення індексу узгодженості визначається середня міра узгодженості п'яти варіантів досліджень, з неї віднімається кількість можливих варіантів вирішення n і результат ділиться на $n-1$. Останній етап визначення коефіцієнта узгодженості полягає в поділі індексу узгодженості ІУ на індекс рандомізації ІР, значення якого для різних значень n обчислюються в методі МАІ спеціальним чином. Для $n=8$ індекс рандомізації складе 1,41.

На рис. 4 зображено попарне порівняння на прикладі обчислення за критерієм розміру вибірки, на рис. 5 наведені результати нормалізації матриці для цього критерію. Обчислення індексу та коефіцієнту узгодженості наведено на рис. 6.

Далі аналогічні дії було проведено для критеріїв часу, ефективності та ціни. На наступному етапі роботи необхідно здійснити аналогічні попарні порівняння для визначення ваги критеріїв (рис. 7).

	Інтерв'ю	Фокус група	Сортування карток	Tree Testing	Оцінка переваг	Eye tracking	Перевірка концепції	A\B тестування
Інтерв'ю	1,00	1,00	0,50	0,17	1,00	1,00	1,00	0,14
Фокус група	1,00	1,00	0,50	0,17	1,00	1,00	1,00	0,14
Сортування карток	2,00	2,00	1,00	0,20	2,00	2,00	2,00	0,17
Tree Testing	6,00	6,00	5,00	1,00	6,00	6,00	6,00	0,50
Оцінка переваг	1,00	1,00	0,50	0,17	1,00	1,00	1,00	0,14
Eye tracking	1,00	1,00	0,50	0,16	1,00	1,00	1,00	0,14
Перевірка концепції	1,00	1,00	0,50	0,17	1,00	1,00	1,00	0,14
A\B тестування	7,00	7,00	5,00	2,00	7,00	7,00	7,00	1,00
Сума	20,00	20,00	13,50	4,03	20,00	20,00	20,00	2,38

Рис. 4 – Приклад розрахунків попарного порівняння

	Інтерв'ю	Фокус група	Сортування карток	Tree Testing	Оцінка	Eye tracking	Перевірка	A\B тестування	Середнє	Міра узгодженості
Інтерв'ю	0,050	0,050	0,037	0,041	0,050	0,050	0,050	0,060	0,049	8,00
Фокус група	0,050	0,050	0,037	0,041	0,050	0,050	0,050	0,060	0,049	8,00
Сортування карток	0,100	0,100	0,074	0,050	0,100	0,100	0,100	0,070	0,087	8,00
Tree Testing	0,300	0,300	0,370	0,248	0,300	0,300	0,300	0,210	0,291	8,14
Оцінка переваг	0,050	0,050	0,037	0,041	0,050	0,050	0,050	0,060	0,049	8,00
Eye tracking	0,050	0,050	0,037	0,040	0,050	0,050	0,050	0,060	0,048	8,00
Перевірка концепції	0,050	0,050	0,037	0,041	0,050	0,050	0,050	0,060	0,049	8,00
A\B тестування	0,350	0,350	0,370	0,497	0,350	0,350	0,350	0,420	0,380	8,15

Рис. 5 – Нормалізована матриця за критерієм розміру вибірки

	Інтерв'ю	Фокус група	Сортування карток	Tree Testing	Оцінка	Eye tracking	Перевірка	A\B тестування	Середнє	Міра узгодженості
Інтерв'ю	0,050	0,050	0,037	0,041	0,050	0,050	0,050	0,060	0,049	8,00
Фокус група	0,050	0,050	0,037	0,041	0,050	0,050	0,050	0,060	0,049	8,00
Сортування карток	0,100	0,100	0,074	0,050	0,100	0,100	0,100	0,070	0,087	8,00
Tree Testing	0,300	0,300	0,370	0,248	0,300	0,300	0,300	0,210	0,291	8,14
Оцінка переваг	0,050	0,050	0,037	0,041	0,050	0,050	0,050	0,060	0,049	8,00
Eye tracking	0,050	0,050	0,037	0,040	0,050	0,050	0,050	0,060	0,048	8,00
Перевірка концепції	0,050	0,050	0,037	0,041	0,050	0,050	0,050	0,060	0,049	8,00
A\B тестування	0,350	0,350	0,370	0,497	0,350	0,350	0,350	0,420	0,380	8,15
									IУ	0,01
									ІР	1,41
									Коеф. узгодженн	0,004

Рис. 6 – Розрахунки за критерієм розміру вибірки

	Кількість витраченого часу	Ціна	Ефективність	Розмір вибірки		
Кількість витраченого часу	1,00	2,00	0,20	0,50		
Ціна	0,50	1,00	0,17	0,33		
Ефективність	5,00	6,00	1,00	4,00		
Розмір вибірки	2,00	3,00	0,25	1,00		
Сума	8,50	12,00	1,62	5,83		
НОРМАЛІЗАЦІЯ						
	Кількість витраченого часу	Ціна	Ефективність	Розмір вибірки	Середнє	Міра узгодженості
Кількість витраченого часу	0,118	0,167	0,124	0,086	0,123	4,016
Ціна	0,059	0,083	0,103	0,057	0,076	4,029
Ефективність	0,588	0,500	0,619	0,686	0,598	4,147
Розмір вибірки	0,235	0,250	0,155	0,171	0,203	4,072
					IУ	0,02
					ІР	0,90
					Коеф. узгодженості	0,02

Рис. 7 – Розрахунки для визначення ваги критеріїв

Процес аналогічний попередньому в тому, що знову виконують порівняння, однак тепер порівнюють не самі методи дослідження, а критерії. Для n=4 індекс рандомізації складе 0,9.

Аналізуючи отримані результати, можна сказати, що важливішим критерієм при виборі методу дослідження є його ефективність. На другому місці знаходиться критерій розміру вибірки, далі час, та на

останньому місці ціна. Міри узгодженості близькі до 4, тому індекс узгодженості і коефіцієнт узгодженості близькі до нуля.

Наступний і останній крок полягає в обчисленні зважених середніх оцінок для кожного варіанта рішення і застосуванні отриманих результатів для прийняття рішення про те, який метод дослідження є кращим (рис. 8).

Критерії	Ваги	Інтерв'ю	Фокус група	Сортування карток	Tree Testing	Оцінка переваг	Eye tracking	Перевірка концепції	A/B тестування
Розмір вибірки	0,203	0,049	0,049	0,087	0,291	0,049	0,048	0,049	0,380
Ціна	0,076	0,057	0,057	0,033	0,162	0,057	0,380	0,096	0,158
Ефективність	0,598	0,091	0,091	0,091	0,182	0,091	0,182	0,091	0,182
Кількість витраченого часу	0,123	0,065	0,049	0,087	0,291	0,049	0,048	0,049	0,380
Зважені середні рейтинги		0,077	0,075	0,085	0,216	0,075	0,153	0,077	0,245

Рис. 8 – Розрахунки середніх оцінок для кожного варіанта

Обговорення результатів

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що найкращою альтернативою за всіма критеріями серед представлених варіантів є A/B-тестування та Tree-testing.

Підводячи підсумки, можна сказати, що на етапі планування проекту найкращими методами дослідження досвіду користувача є фокус групи та інтерв'ю, на етапі розробки – Tree-testing, на етапі запуску і розробки – A/B-тестування.

Висновки

Дослідження UX хоч і не є новим явищем у галузі дизайну, але активно розвивається та набуває більшої популярності. Дослідження UX дає важливе і чітке усвідомлення того, що дизайн повинен ґрунтуватися на потребах користувачів.

Чим більше точок даних використовується, тим впевненіше можна бути у припущеннях, що формуються. Зовсім не обов'язково використовувати всі перераховані методи тестування UX у кожному проекті, але корисно застосувати кілька різних методів, зокрема й у роботі з поточними потребами кожної ітерації. Отримані дані допоможуть у роботі над поточними проектами чи у створенні нових продуктів.

Список літератури

1. Norman D., Verganti R. Incremental and radical innovation: Design research vs. technology and meaning change. *Design Issues*. 2014. 30 (1). P. 78-96. doi:10.1162/DESI_a_00250.
2. Kaufman M., Kuniavsky M. *Observing the user experience: A Practitioner's Guide to User Research*. Elsevier Science. 2012. № 2. 608 p. doi:10.1016/C2010-0-64844-9.
3. Cooper A. *About Face: The Essentials of Interaction Design*. Wiley. 2014. № 4. 720 p. doi:10.1057/palgrave.ivs.950066.

4. Sauro J., Lewis R. J. Quantifying the User Experience *Practical Statistics for User Research*. 2016. № 2. P. 9-18. doi:10.1016/c2015-0-06873-3.
5. Park J. Developing Elements of User Experience for Mobile Phones and Services: Survey, Interview, and Observation Approaches. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*. 2012. № 4. P. 279-293. doi:10.1002/hfm.20316.
6. Nielsen Norman Group. World Leaders in Research-Based User Experience. When to Use Which User-Experience Research Methods. URL: <https://www.nngroup.com/articles/which-ux-research-methods> (дата звернення 27.07.2022).
7. Stull E. UX Fundamentals for Non-UX Professionals. *User Experience Principles for Managers, Writers, Designers, and Developers*. 2018. P. 233-258. doi:10.1007/978-1-4842-3811-0.
8. Nielsen Norman Group. World Leaders in Research-Based User Experience. UX Research Cheat Sheet. URL: <https://www.nngroup.com/articles/ux-research-cheat-sheet> (дата звернення 27.07.2022).
9. Kraft C. *User Experience Innovation*. Berkeley, CA: Apress, 2012. 248 p. doi:10.1007/978-1-4302-4150-8.
10. Levy J. *UX Strategy: How to Devise Innovative Digital Products that People Want*. O'Reilly Media. 2015, 312 p.
11. Nielsen Norman Group. World Leaders in Research-Based User Experience. Card Sorting: How Many Users to Test. URL: <https://www.nngroup.com/articles/card-sorting-how-many-users-to-test/> (дата звернення 29.07.2022).
12. Nielsen Norman Group. World Leaders in Research-Based User Experience. The Funnel Technique in Qualitative User Research URL: <https://www.nngroup.com/articles/the-funnel-technique-in-qualitative-user-research/> (дата звернення 29.07.2022).
2. Kaufman M., Kuniavsky M. *Observing the user experience: A Practitioner's Guide to User Research*. Elsevier Science, 2012, no. 2, 608 p., doi:10.1016/C2010-0-64844-9.
3. Cooper A. *About Face: The Essentials of Interaction Design*, Wiley, 2014, no. 4, 720 p., doi:10.1057/palgrave.ivs.950066.
4. Sauro J., Lewis R. J. Quantifying the User Experience *Practical Statistics for User Research*, 2016, no. 2, pp. 9-18, doi:10.1016/c2015-0-06873-3.
5. Park J. Developing Elements of User Experience for Mobile Phones and Services: Survey, Interview, and Observation Approaches. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 2012, no. 4, pp. 279-293, doi:10.1002/hfm.20316.
6. Nielsen Norman Group. World Leaders in Research-Based User Experience. When to Use Which User-Experience Research Methods. Available at: <https://www.nngroup.com/articles/which-ux-research-methods> (accessed 27.07.2022).
7. Stull E. UX Fundamentals for Non-UX Professionals. *User Experience Principles for Managers, Writers, Designers, and Developers*, 2018, pp. 233-258, doi:10.1007/978-1-4842-3811-0.
8. Nielsen Norman Group. World Leaders in Research-Based User Experience. UX Research Cheat Sheet. Available at: <https://www.nngroup.com/articles/ux-research-cheat-sheet> (accessed 27.07.2022).
9. Kraft C. *User Experience Innovation*. Berkeley, CA. Apress, 2012, 248 p., doi:10.1007/978-1-4302-4150-8.
10. Levy J. *UX Strategy: How to Devise Innovative Digital Products that People Want*. O'Reilly Media. 2015, 312 p.
11. Nielsen Norman Group. World Leaders in Research-Based User Experience. Card Sorting: How Many Users to Test. Available at: <https://www.nngroup.com/articles/card-sorting-how-many-users-to-test/> (accessed 29.07.2022).
12. Nielsen Norman Group. World Leaders in Research-Based User Experience. The Funnel Technique in Qualitative User Research Available at: <https://www.nngroup.com/articles/the-funnel-technique-in-qualitative-user-research/> (accessed 29.07.2022).

References (transliterated)

1. Norman D., Verganti R. Incremental and radical innovation: Design research vs. technology and meaning change. *Design Issues*, 2014, 30 (1), pp. 78-96, doi:10.1162/DESI_a_00250.

Відомості про авторів (About authors)

Єгорова Ірина Миколаївна – к.т.н., доцент, професор кафедри Медіасистем і технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5242-0096; e-mail: iryna.iegorova@nure.ua.

Irina Iegorova – Candidate Of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Professor Of Department Of Media Systems and Technologies, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; Orcid: 0000-0002-5242-0096; e-mail: iryna.iegorova@nure.ua

Ільченко Катерина Володимирівна – магістрант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна; e-mail: kateryna.ilchenko@nure.ua

Ilchenko Kateryna – Master's Degree, Department Of Media Systems And Technologies, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: kateryna.ilchenko@nure.ua

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Єгорова І. М., Ільченко К. В. Особливості тестування інтерфейсу користувача. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 18-23. doi:10.20998/2413-4295.2022.04.03.

Please cite this article as:

Iegorova I., Ilchenko K. Peculiarities of UI testing. *Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4(14), pp. 18–23, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.03.

Надійшла (received) 29.09.2022

УДК 681.518.22

doi:10.20998/2413-4295.2022.04.04

РОЗРОБЛЕННЯ СИТУАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ З НЕЧІТКОЮ ЛОГІКОЮ ДЛЯ ДРУГОГО РІВНЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

С. І. КОНДРАШОВ, І. В. ГРИГОРЕНКО*, О. С. ОПРИШКІН

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: grigmaestro@gmail.com

АНОТАЦІЯ На сьогодні при виробництві і у побуті стає питання підвищення якості та ефективності систем помелу. Це можуть бути як цементні і поробляючи зерно заводи, так і кав'ярні, що використовують машини для помелу кави. Ефективне управління процесом помелу має велике значення для збільшення продуктивності і якості кінцевого продукту. Управління процесом помелу є складною задачею внаслідок того, що на процес впливають багато чинників. Крім чинників треба враховувати при аналізі ще ступень зносу ріжучих поверхонь, люфт у механічних передачах, що збільшує відстань між жорновами і матеріал, з якого вони вироблені. Математичні моделі, що описують процес помелу не можуть бути повністю досконалими, бо містять обмежену кількість чинників, які впливають на процес і всі вони визначаються у різних фізичних величинах. Також при розробці математичної моделі практично неможливо врахувати динамічні зміни у об'єкті контролю, які можуть бути як лінійними, так і нелінійними. Всі ці особливості складного об'єкту контролю роблять необхідним перехід до створення ситуаційної системи з нечіткою логікою, яка надасть можливість врахувати усі особливості і складності, що виникають при створенні «образу» об'єкта контролю. Для розроблення ситуаційної системи з нечіткою логікою обрано найбільш прийнятний для задач метрологічного забезпечення метод побудови нечіткого висновку ситуаційного типу Мамдані. За допомогою графічного інтерфейсу користувача вдалося побудувати ситуаційну систему з нечіткою логікою, яка надала можливість встановити для другого рівня інформаційно-вимірювальної системи, де формується технологічний і метрологічний «образ» об'єкта контролю з урахуванням впливу зовнішніх та внутрішніх факторів, необхідні технологічні режими, що позитивно вплинуть на однорідність помелу.

Ключові слова: нечітка логіка; евристичний аналізатор; метрологічний образ; однорідність помелу; вимірювання

DEVELOPMENT OF A SITUATION SYSTEM WITH FUZZY LOGIC FOR THE SECOND LEVEL OF THE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM

S. KONDRASHOV, I. HRYHORENKO*, O. OPRYSHKIN

Department of information and measuring technologies and systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Nowadays, in production and in everyday life, there is a question of improving the quality and efficiency of grinding systems. These can be both cement and grain factories, as well as coffee shops that use machines for grinding coffee. Effective management of the grinding process is of great importance for increasing the productivity and quality of the final product. Management of the grinding process is a complex task because many factors affect the process. In addition to the factors, the degree of wear of the cutting surfaces, the backlash in mechanical transmissions, which increases the distance between the grinders, and the material from which they are made, must also be taken into account during the analysis. Mathematical models describing the grinding process cannot be completely perfect, because they contain a limited number of factors that affect the process and all of them are defined in different physical quantities. Also, when developing a mathematical model, it is practically impossible to take into account dynamic changes in the object of control, which can be both linear and non-linear. All these features of a complex object of control make it necessary to move to the creation of a situational system with fuzzy logic, which will provide an opportunity to take into account all the features and complexities that arise when creating an «image» of the object of control. For the development of a situational system with fuzzy logic, the method of constructing a fuzzy conclusion of the Mamdani situational type, most suitable for the tasks of metrological support, was chosen. With the help of a graphical user interface, it was possible to build the situational system with fuzzy logic, which made it possible to establish the second level of the information and measurement system, where the technological and metrological «image» of the control object is formed, taking into account the influence of external and internal factors, the necessary technological regimes that will positively affect the uniformity of grinding.

Keywords: fuzzy logic; heuristic analyzer; metrological image; homogeneity of grinding; measurement

Вступ

На сьогодні при виробництві і у побуті стає питання підвищення якості та ефективності систем помелу. Це можуть бути як цементні і поробляючи зерно заводи, так і кав'ярні, що використовують машини для помелу кави. Зупинимося докладніше на останніх [1]. Ефективне управління процесом помелу

має велике значення для збільшення продуктивності і якості кінцевого продукту. Управління процесом помелу є складною задачею внаслідок того, що на процес впливають багато чинників. Існують два основні види кавомолок – жорнові і ударної дії. Жорнові кавомолки технологічно складніші за удані і в них зерна кави перемелюються двома жорнами, один з них обертається, а інший – нерухомий. На

відміну від ударних кавомолок, жорнові кавомолки дають більш якісний помел кави і дозволяють регулювати ступінь помелу. Далі будимо розглядати саме жорнові кавомолки.

Чинники, що впливають на однорідність помелу пов'язані як із кліматичними умовами та і з параметрами сировини. Наприклад, це і сорт кави, ступінь її обсмаження, вологість зерна, матеріал з якого зроблені жорнова (сталь або кераміка) та швидкість їх обертання, а також вологість і температура у приміщенні. Однак крім вказаних чинників треба враховувати при аналізі ще ступінь зносу ріжучих поверхонь, люфт у механічних передачах, що збільшує відстань між жорновими і матеріал, з якого вони вироблені.

Отже, математичні моделі, що описують процес помелу не можуть бути повністю досконалими, бо містять обмежену кількість чинників, які впливають на процес і всі вони визначаються у різних фізичних величинах. Також при розробці математичної моделі практично неможливо врахувати динамічні зміни у об'єкті контролю, які можуть бути як лінійними, так і нелінійними. Всі ці особливості складного об'єкту контролю роблять необхідним перехід до створення ситуаційної системою з нечіткою логікою, яка надасть можливість врахувати усі особливості і складності, що виникають при створенні «образу» об'єкта контролю.

Об'єкт дослідження – ситуаційна система з нечіткою логікою.

Предмет дослідження – фактори, що впливають на однорідність процесу помелу зерна кави.

Мета роботи

Для того, щоб отримати інформацію про зміни у стані об'єкта контролю необхідно використовувати первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП), що входять до складу вимірювальних каналів, а також вимірювально-обчислювальні комплекси, які будуть здатні обробляти отриману інформацію, необхідну для прийняття рішення про метрологічний стан об'єкту контролю. Система вимірювальних перетворювачів (ВП) із блоком управління і координації метрологічного стану можна розглядати як «складну систему», у якій значну частину інформації, необхідної для здійснення задач метрологічної координації [2], надано у вигляді рекомендацій спеціалістів-технологів і метрологів.

Такий погляд на систему дозволяє поєднати теорії статистичних методів оцінки стану об'єкта контролю із теорією нечітких множин (fuzzy-logic), які не розглядалися спеціалістами метрологами як об'єкти метрологічного забезпечення.

Використання системи fuzzy-logic обумовлено тим, що вона дає змогу для формалізації нечітких понять з точки зору їх семантики і забезпечує ефективну обробку якісної експертної інформації

поряд з чіткою статистичною кількісною інформацією. Більше того, використання нечіткої логіки при оцінці складних ситуацій і побудові моделей метрологічної координації полегшує задачу «спілкування» експерта-метролога із ситуаційною системою з нечіткою логікою мовою науки «Метрологія» [2,3].

Проведений аналіз існуючих автоматичних та автоматизованих систем управління технологічними процесами помелу [4-6] дає можливість стверджувати, що задача метрологічного контролю таких систем на цей час ще далека від свого вирішення і потребує використання нових нестандартних підходів для оцінки метрологічної надійності подібних систем.

Отже стає задача – підвищення ефективності та якості управління системами помелу завдяки використанню ситуаційної системи з нечіткою логікою.

Рішення задачі зводиться до побудови експертної системи з нечіткою логікою, що буде корисна для експерта-метролога, який приймає рішення про оцінку стану об'єкта контролю. Задачі, що вирішує експертна система можна розділити на два рівні. На першому рівні інформаційно-вимірювальна система призначає відповідні допуски для кожного із параметрів, що контролюються, що дає змогу визначити необхідні засоби вимірювань і значення їх граничних похибок, які необхідно контролювати у робочих режимах. Також можливо вирішувати задачу прогнозування стану кожного перетворювача.

На другому рівні формується технологічний і метрологічний «образ» об'єкта контролю з урахуванням впливу зовнішніх та внутрішніх факторів. Метрологічний образ об'єкта є комплексним і багатовимірним. Разом із цим згідно з прийнятою моделлю ситуаційної системи з нечіткою логікою (ССНЛ) для кожного ВП визначається оптимальна робоча точка, яка зміщується в полі допуску похибки ВП.

Мета роботи – розроблення ситуаційної системи з нечіткою логікою для підвищення ефективності та якості управління системами помелу зерна кави із визначенням такого співвідношення між параметрами, що забезпечить максимальну однорідність помелу.

Основна частина

У роботі [7] досліджено конструкцію жорнової кавомолки, що входить до складу кавової машини, встановлено основні фактори, що впливають на якість помелу кавового зерна в кавомолках автоматичних кавомашин, а також проведені експериментальні дослідження впливу конструктивних параметрів кавомолки та параметрів процесу перемелювання на ступінь однорідності помелу кавового зерна. Авторами розроблено рекомендації по вибору

оптимальних параметрів процесу перемелювання кави у кавомолках автоматичних кавомашин. Отримані у роботі [7] результати стали у нагоді при визначенні меж зміни основних параметрів, що впливають на якість помелу зерна кави при створенні ситуаційної системи з нечіткою логікою.

У реальних системах помелу, у яких знаходження робочої точки у межах встановленого допуску пропонується визначати тестовими методами у робочих режимах при дії зовнішніх впливів, можна говорити лише про сукупність можливих значень випадкових складових сумарної похибки ВП, що мають різні ймовірності [8].

Алгоритм роботи системи нечіткої логіки складається з послідовного виконання трьох операцій: фазифікації, обчислення правил і дефазифікації, або приведення до чіткості [9]. Для формування систематики нечітких понять використовуються лінгвістичні зміни як особлива форма організації експертної інформації. Етап фазифікації статистичних даних метрологічного експерименту полягає у визначенні ступені істинності, тобто значення функцій приналежності для кожного правила (передумов). Іншими словами – відбувається перехід від чітких значень у формі чисел до лінгвістичних терм, що характеризують діапазон зміни вхідних числових даних. Статистична інформація про похибки ВП відображується у нечіткій множині відповідно до предметної шкали сформованої групою або одним експертом-метрологом.

Формалізований опис нечіткої поточної ситуації поступає у блок прийняття рішень. Отримана інформація ідентифікується з однією з типових ситуацій шляхом пошуку останньої на основі співставлення ситуацій. Цей етап відноситься до обчислення правил, тобто формування нечіткого висновку. Саме блок прийняття рішень формує вихідний дефазифікований сигнал у зручному для експерта-метролога вигляді. Операція дефазифікації полягає у зворотному переході від лінгвістичних терм з якими складались правила до чітких висновків у числовій формі.

Для формування висновків необхідно використовувати апарат нечіткого висновку. У даний час існує багато алгоритмів нечіткої логіки. Найбільш часто використовуються такі: алгоритми Мамдані [10], Цукамото [11], Сугено [12,13], Ларсена [14]. У роботі [15] було обрано моделі для лінгвістичних змінних у нечіткому логічному виведенні Мамдані та доведено його перевагу над іншими методами в оцінці якості. Найбільш прийнятними для задач метрологічного забезпечення є методи побудови нечіткого висновку ситуаційного типу Мамдані. Для них не потрібні великі об'єми оперативної пам'яті і вони використовують достатньо прості алгоритми, які можуть бути реалізовані без використання спецпроцесорів на звичайних ЕОМ у програмі MatLab.

Прийняття рішення виконується блоком прийняття рішень і полягає у співставленні поточного стану ВП з усіма еталонними ситуаціями, визначенні еталонної ситуації, найбільш близької до поточної, і формуванні керуючого рішення. Це рішення пропонується експерту-метрологу, який і приймає остаточне рішення.

Структурна схема нечіткої моделі управління для задачі контролю якості помелу наведена на рис. 1.

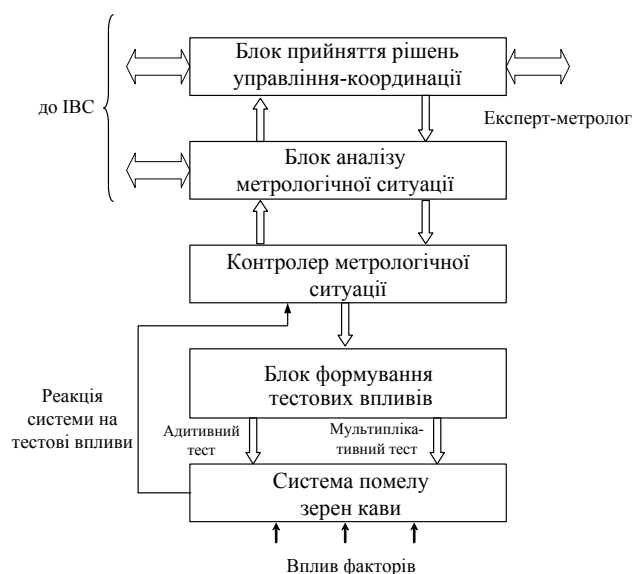


Рис. 1 – Структурна схема нечіткої моделі управління для задачі контролю якості помелу

Представлена структура працює наступним чином: для отримання інформації щодо відповідності метрологічних характеристик системи помелу встановленим значенням блок формування тестових впливів формує адитивний, мультиплікативний або комбінований тести для системи; інформація про реакцію системи на тестовий вплив надходить до контролеру метрологічної ситуації; БАМС формує формалізований опис метрологічної ситуації, яка виникла на об'єкті (система помелу зерна кави) для вимірювальної підсистеми інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) і блоку прийняття рішень управління-координації на підставі результатів контролю ВП. Алгоритм роботи системи нечіткої логіки складається з послідовного виконання трьох операцій: фазифікації, обчислення правил і дефазифікації, або приведення до чіткості.

Для формування систематики нечітких понять використовуються лінгвістичні зміни як особлива форма організації експертної інформації. Етап фазифікації статистичних даних метрологічного експерименту полягає у визначенні ступені істинності, тобто значення функцій приналежності для кожного правила (передумов). Іншими словами – відбувається перехід від чітких значень у формі чисел до лінгвістичних терм, що характеризують діапазон зміни вхідних числових даних. Статистична

інформація про похибки ВП відображується у нечіткі множини відповідно до предметної шкали сформованої групою або одним експертом-метрологом.

Формалізований опис нечіткої поточної ситуації поступає у блок прийняття рішень. Отримана інформація ідентифікується з однією з типових ситуацій шляхом пошуку останньої на основі співставлення ситуацій. Цей етап відноситься до обчислення правил, тобто формування нечіткого висновку. Саме блок прийняття рішень формує вихідний дефазифікований сигнал у зручному для експерта-метролога вигляді. Операція дефазифікації полягає у зворотному переході від лінгвістичних терм з якими складались правила до чітких висновків у числовій формі.

Розглянемо варіант побудови ССНЛ для другого рівня ІВС, де формується технологічний і метрологічний «образ» об'єкта контролю з урахуванням впливу зовнішніх та внутрішніх факторів, що впливають на однорідність помелу зерна кави. Для побудови ситуаційної системи з нечіткою логікою слід визначити, які параметри об'єкта контролю будуть вхідними, а який параметр буде вихідним. У якості вхідних параметрів, що змінюють свої значення у певному діапазоні фізичних величин обираємо: вологість зерна (% RH), відстань між жорновими (мм), швидкість обертання жорнову (об/хв), час помелу (сек). Вихідна величина це – відсоток однорідності помелу з партії.

Однорідність помелу кавового зерна впливає на час екстракції смакових речовин. При дрібному помелі процес екстракції відбувається швидше, напій набуває зайвої гіркоти, крім того, через дуже дрібний помел вода у кавомашині проходить повільніше або взагалі не проходить. При крупному помелі – екстракція смакових речовин із кави не відбувається у належній мірі. Рекомендується обирати помел в межах середніх значень, які дозволяють каві розкрити свої найкращі смакові якості. Отже ступінь помелу зерна кави і його однорідність визначаються рядом факторів і суттєво впливають на смакові якості. Розмір фракцій повинен бути рівномірним, для того, щоб смак кави вийшов відмінним. Перш ніж експортувати каву, всі кавові зерна висушують до рівня вологості в них 10 – 12 %. Тільки в цьому випадку зерно вважається якісним, бо нічого не зіпсується і не постаріє.

Розглянемо основні аналітичні співвідношення нечіткого логічного висновку за алгоритмом Mamdani. Цей алгоритм на зараз одержав найбільше практичне застосування у задачах нечіткого моделювання. Алгоритмом Mamdani відрізняє від інших алгоритмів те, що його правила логічного висновку у правій частині містять нечіткі значення (функції належності). При використанні максимуму як оператора агрегації й мінімуму як оператора імплікації процедура одержання нечіткого значення виходу є композицією *max-min* [8,9].

Нечіткий логічний висновок за цим алгоритмом виконується за нечіткою базою знань:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left(\bigcap_{i=1}^n x_i = a_{ijp} \text{ з вагою } \omega_{jp} \right) \rightarrow y = T_j, j = \overline{1, m},$$

де значення вхідних і вихідних змінних задані нечіткими множинами.

Треба ввести наступні позначення: $\mu_{jp}(x_i)$ – функція належності входу x_i нечіткому терму a_{ijp} , тобто

$$a_{ijp} = \int_{x_{-i}}^{x_i} \frac{\mu_{jp}(x_i)}{x_i}, x_i \in |x_{-i}, \bar{x}_i|;$$

$\mu_{T_j}(y)$ – функція належності виходу нечіткому терму T_j , а саме

$$T_j = \int_{y_{-}}^{\bar{y}} \frac{\mu_{T_j}(y)}{y}, y \in |y_{-}, \bar{y}|.$$

Ступені належності вхідного вектору $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, нечітким термам T_j з бази знань можуть бути розраховані:

$$\mu_{T_j}(X^*) = \bigvee_{p=1, k_j} \omega_{jp} \bigwedge_{i=1, n} \left[\mu_{jp}(x_i^*) \right] j = \overline{1, m},$$

де $\vee(\wedge)$ – операція з s -норми (t -норми), тобто з множини реалізацій логічних операцій АБО (І). Найбільш часто використовуються наступні реалізації: для операції АБО – знаходження максимуму і для операції І – знаходження мінімуму [8,9]. В результаті можна отримати наступну нечітку множину \tilde{y} , відповідну вхідному вектору X^* :

$$\tilde{y} = \frac{\mu_{T_1}(X^*)}{T_1} + \frac{\mu_{T_2}(X^*)}{T_2} + \dots + \frac{\mu_{T_m}(X^*)}{T_m}.$$

Особливістю цієї нечіткої множини є те, що для неї є універсальною терм-множина вихідної змінної у [8,9]. Щоб перейти від нечіткої множини, заданої на універсальній множині нечітких термів $\{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ до нечіткої множини на інтервалі $|y_{-}, \bar{y}|$ необхідно:

«зрізати» функції належності $\mu_{T_j}(y)$ на рівні $\mu_{T_j}(X^*)$; далі, агрегувати отримані нечіткі множини:

$$\tilde{y} = \text{agg}_{j=\overline{1, m}} \left(\int_{y_{-}}^{\bar{y}} \frac{\min(\mu_{T_j}(X^*), \mu_{T_j}(y))}{y} \right).$$

Чітке значення виходу y , яке відповідне вхідному вектору X^* визначається у результаті дефазифікації нечіткої множини \tilde{y} [8,9].

Формування бази правил системи нечіткого висновку здійснюється у вигляді упорядкованого узгодженого списку нечітких правил у вигляді «IF A THEN B», де антецеденти ядр правил нечіткої продукції побудовані за допомогою логічних зв'язків «I», а консеквенти ядр правил нечіткої логіки не складні. Фазифікація вхідних змінних здійснюється описаним вище способом, так само, як і у загальному випадку при побудові системи нечіткого висновку. Агрегування правил нечіткої логіки здійснюється за допомогою класичної нечіткої логічної операції «I» двох елементарних висловлювань A, B:

$$T(A \cap B) = \min\{T(A); T(B)\},$$

а активізація правил нечіткої логіки здійснюється методом *min*-активізації $\mu(y) = \min\{c; \mu(x)\}$, де $\mu(x)$ і c – відповідно функції належності термів лінгвістичних змінних і ступеня істинності нечітких висловлювань, що утворюють відповідні консеквенти ядр нечітких продукційних правил. Акумуляція правил нечіткої логіки проводиться за допомогою класичного для нечіткої логіки *max* – об'єднання функцій належності $\forall x \in X \mu ABx = \max\{\mu Ax; \mu Bx\}$ [8,9].

Дефазифікація проводиться методом центру ваги або центру площі:

$$y = \frac{y_- \int_{y_-}^{\bar{y}} y \cdot \mu_{\bar{y}}(y) dy}{\int_{y_-}^{\bar{y}} \mu_{\bar{y}}(y) dy}.$$

Найбільш часто вживається метод дефазифікації, що має назву – центр ваги. Але, застосовуючи цей метод необхідно пам'ятати, що діапазон чітких значень вихідних змінних буде завжди вужче інтервалу, на якому вона визначена. Цього недоліку позбавлений другий за частотою використання метод дефазифікації – центр максимумів. При використанні методу центру

максимумів слід враховувати те, що результат дефазифікації не чутливий до вкладу правил, ступені виконання яких малі, і залежить лише від правил, ступені виконання яких максимальні [8,9].

Для побудови ситуаційної системи з нечіткою логікою використаємо інтерфейс користувача системи fuzzy-logic програми MatLab. Зафіксуємо значення відстані між жорновами на рівні 0,5 мм. Тоді у моделі залишимо три входи і один вихід. У якості першого входу будемо використовувати показник – оберти валу двигуна, на якому закріплена рухома частина жорнову. Другий вхід – час, у продовж якого здійснюється помел. Третій вхід – вологість кавового зерна. Вихідним параметром буде – відсоток однорідності помелу зерна (рис. 2).

Задаємо функції належності для обраної вхідної змінної – оберти валу двигуна. У пункті Range встановимо діапазон у якому змінюється функція (від 500 до 1200 об/хв). Задаємо тип функції належності для трьох функцій належності, а саме мінімальної (*min*), середньої (*norm*) та максимальної (*max*). Обираємо розподіл за нормальним законом для усіх трьох функцій (рис. 3).

Задаємо функції належності для другої вхідної величини – час, у продовж якого здійснюється помел. Встановимо діапазон у якому змінюється функція (від 15 до 18 секунд) (рис. 4).

Задаємо функції належності для третьої вхідної величини – вологість кавового зерна. Встановимо діапазон у якому змінюється функція (від 9 до 14 % RH.) (рис. 5).

Задаємо функції належності для обраної вихідної змінної – відсоток однорідності помелу зерна. Встановимо діапазон у якому змінюється функція (від 70 до 100 %). Задаємо тип функції належності для трьох функцій належності, а саме погано – (*bad*), задовільно – (*average*) та відмінно – (*good*). Обираємо розподіл (*trimf*) трикутний закон розподілу (рис. 6).

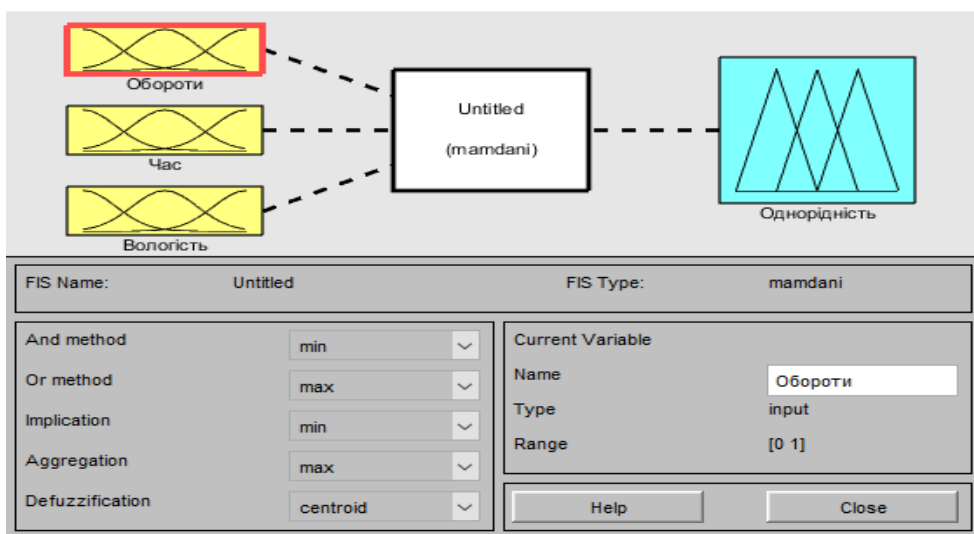


Рис. 2 – Вікно завдання вхідних та вихідних параметрів

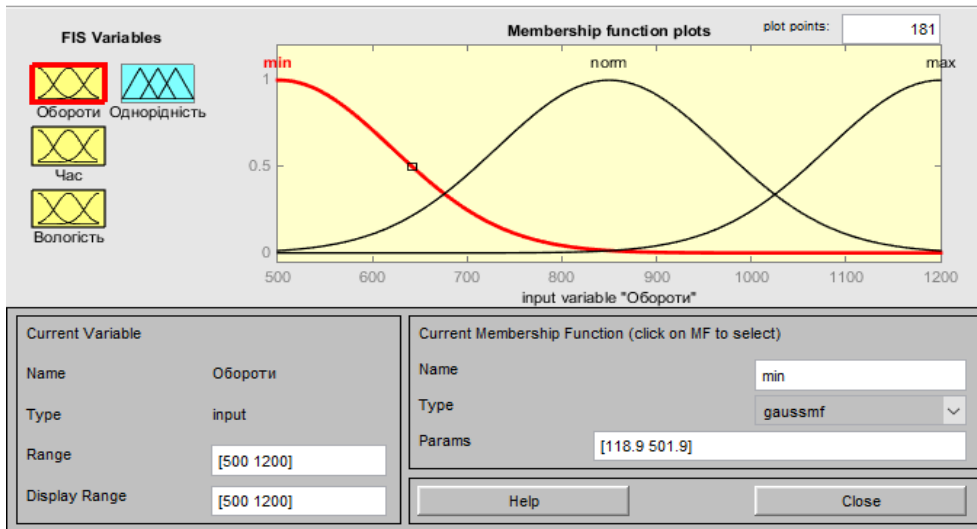


Рис. 3 – Вікно завдання обертів валу двигуна

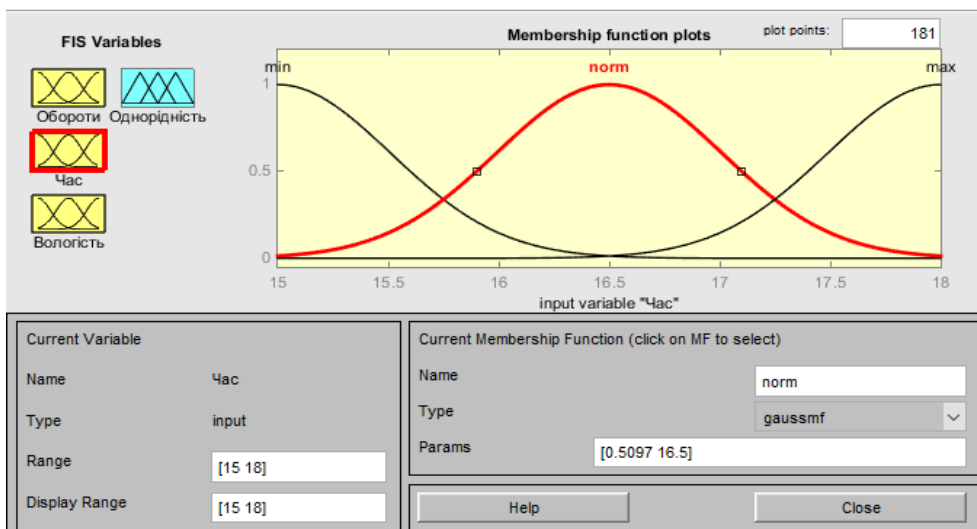


Рис. 4 – Вікно завдання часу, у продовж якого здійснюється помел

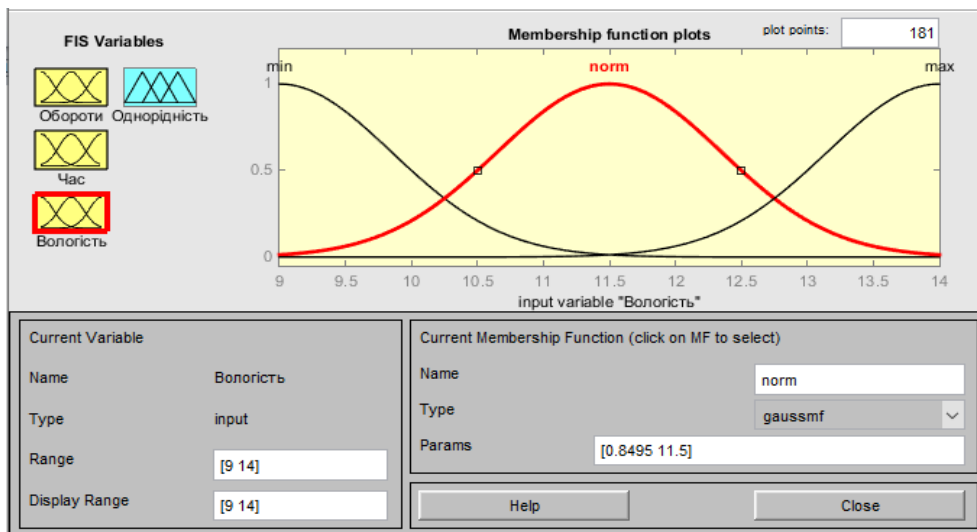


Рис. 5 – Вікно завдання зміни вологості кавового зерна

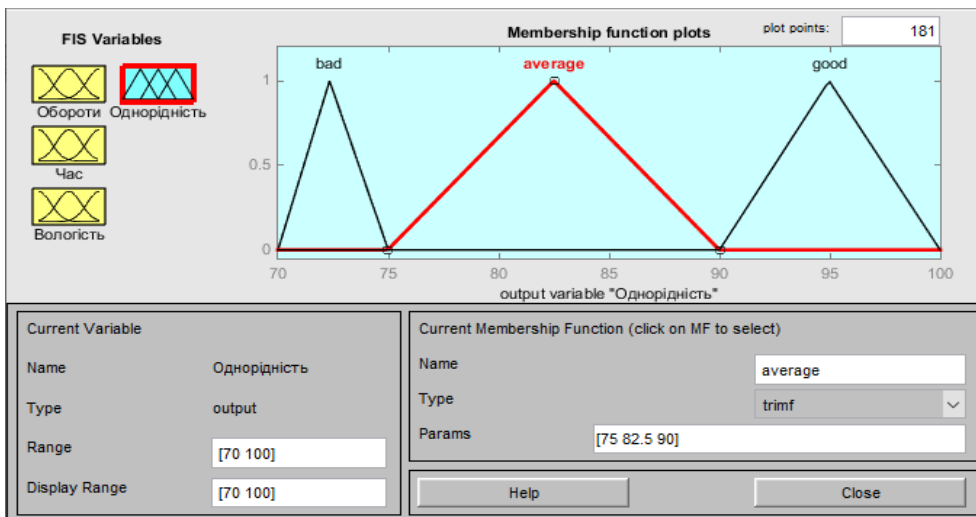


Рис. 6 – Вікно завдання вихідного параметру – відсоток однорідності помелу зерна

Оскільки система має три входи, тому максимум вихідних станів $3 \cdot 3 \cdot 3 = 27$ різних вихідних комбінацій. Графічне зображення дії правил представлено на рис. 7, рис. 8, рис. 9, рис. 10.

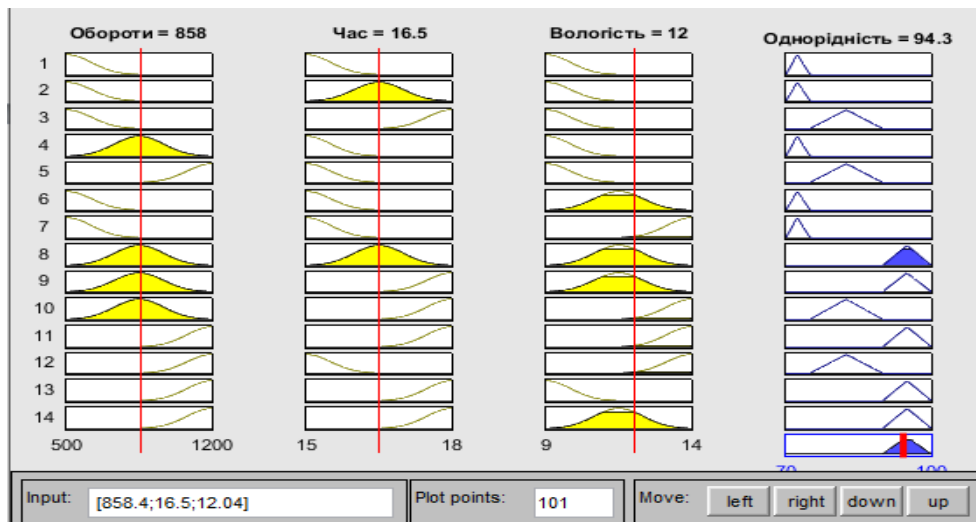


Рис. 7 – Графічне зображення дії правил, що демонструє отримання максимальної однорідності помелу

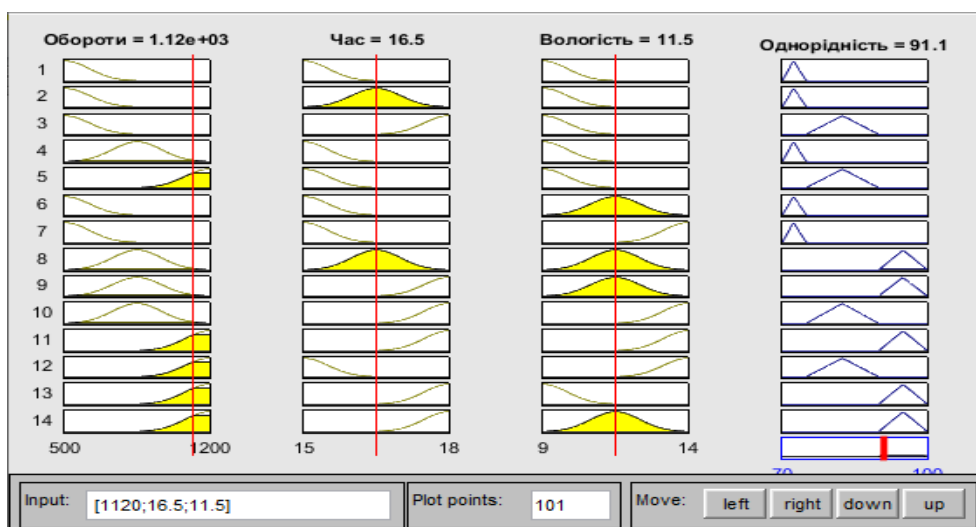


Рис. 8 – Графічне зображення дії правил, що демонструє, як змінюється однорідність помелу при збільшенні обертів валу двигуна

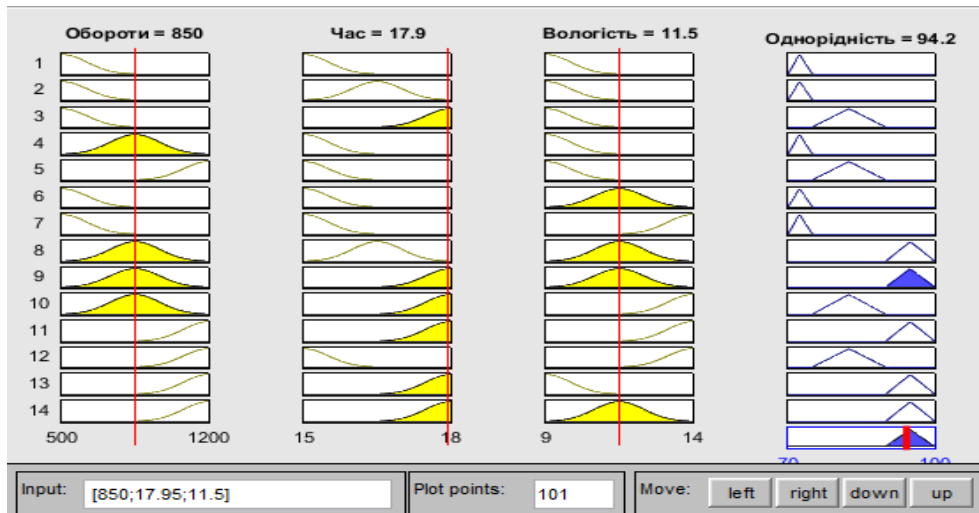


Рис. 9 – Графічне зображення дії правил, що демонструє, як змінюється однорідність помелу при збільшенні часу помелу

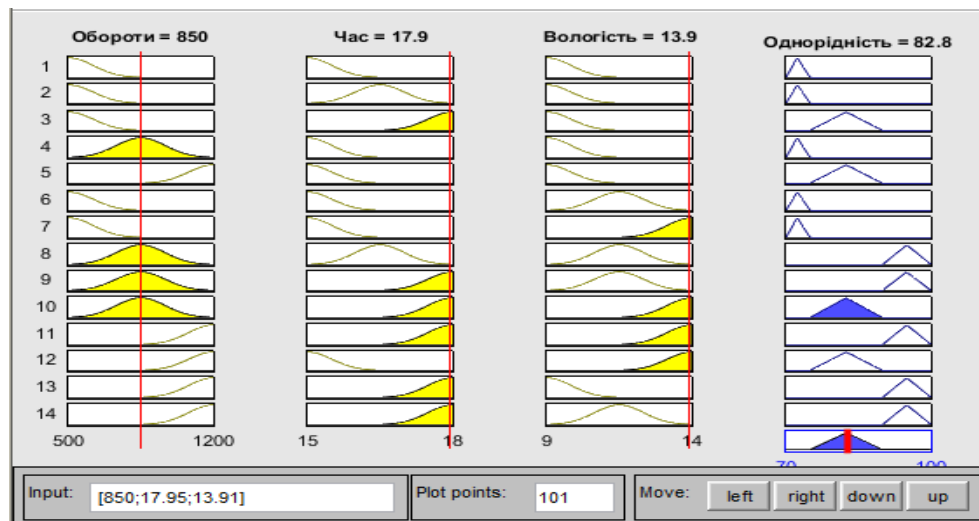


Рис. 10 – Графічне зображення дії правил, що демонструє, як змінюється однорідність помелу при збільшенні вологості зерна кави

Поверхні відгуку при трьох можливих однорідність помелу представлено на рис. 11, рис. 12, сполученнях параметрів, що впливають на рис. 13.

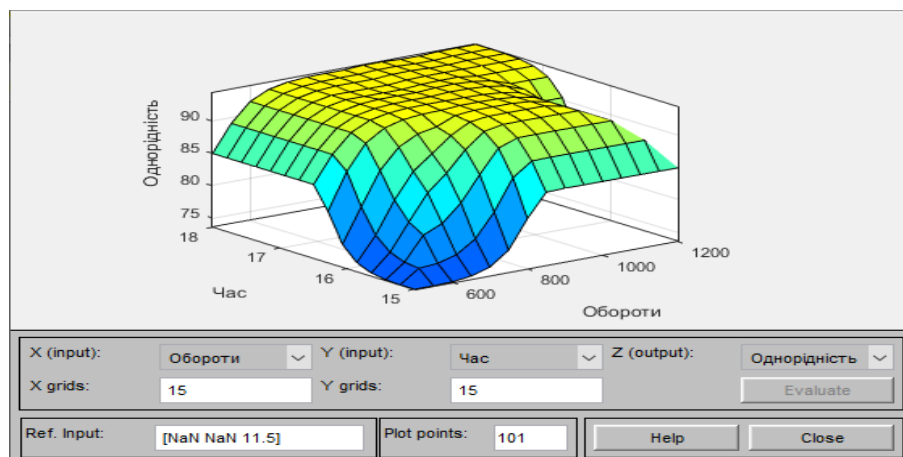


Рис. 11 – Поверхня відгуку значень часу помелу та обертів двигуна, що впливають на однорідність помелу

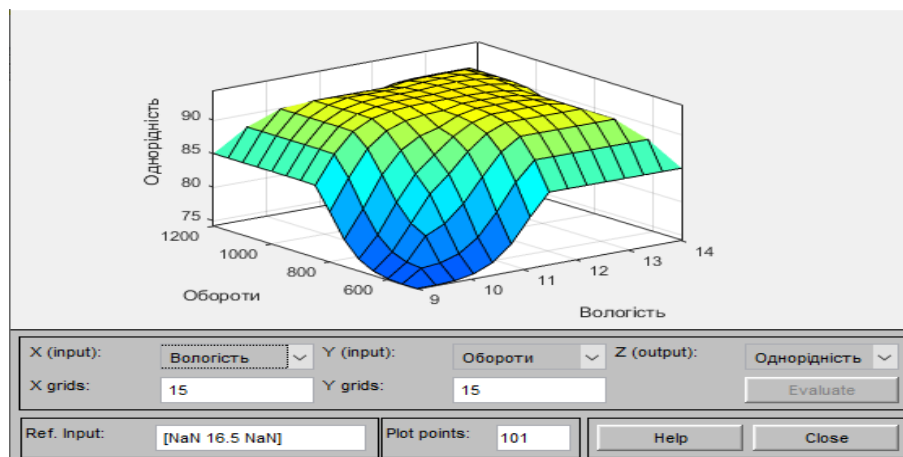


Рис. 12 – Поверхня відгуку значень вологості зерна кави та обертів валу двигуна, що впливають на однорідність помелу

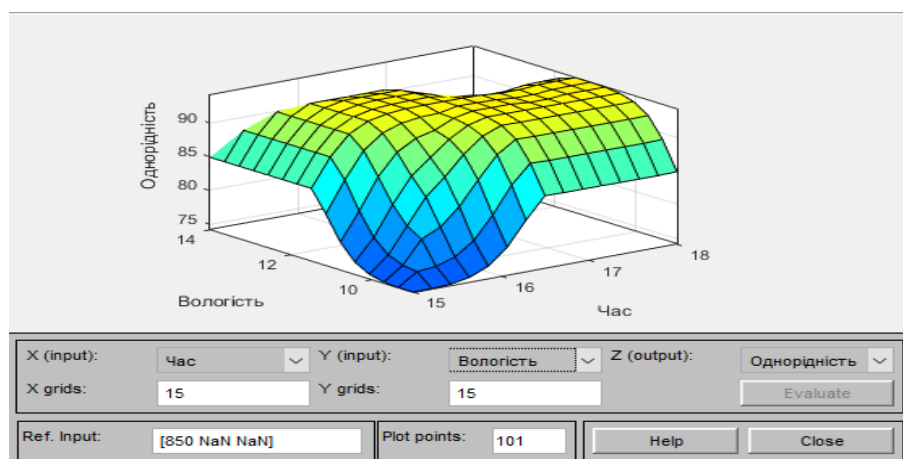


Рис. 13 – Поверхня відгуку значень вологості зерна кави і часу помелу, що впливають на однорідність помелу

Результати

На підставі проведеного комп'ютерного моделювання з використанням інтерфейсу користувача системи fuzzy-logic, отримані наступні результати:

1) встановлено, що максимальну однорідність помелу кави (94,3 %) можна отримати при тривалості помелу не менш 16,5 секунд, при обертах валу двигуна 858 об/хв, і вологості зерна кави не більше ніж 12 % (рис. 7).

2) доведено, що збільшення обертів валу двигуна до 1200 об/хв (рис. 8) не призводить до різкого підвищення однорідності помелу, а лише збільшує енергозатрати на процес помелу, що підтверджує результати, отримані у [7].

3) встановлено, що підвищення часу помелу до 18 секунд не призводить до зростання однорідності помелу (рис. 9).

4) Із результату, що демонструє рис. 10 стає очевидним, що збільшення вологості зерна кави до рівня 14 % призводить до погіршення якості помелу.

У результаті досліджень, що представлені у роботі [7] встановлено оптимальне значення частоти

обертання жорен кавомолки на рівні 850 об/хв, яке забезпечує максимальну якість мелених кавового зерна 82,85 % від загальної маси, у той час, як при стандартній швидкості жорен 500 об/хв однорідність помелу складала 77,7 %. Ці результати цілком збігаються з результатами, що отримані авторами завдяки використанню ССНЛ: 858 об/хв дає 94,3 % однорідності помелу від загальної маси зерна кави. Однак при цьому необхідно щоб час помелу був не менший за 16,5 секунд (у роботі [7] приблизно 18 секунд) і вологість зерна не більше ніж 12 % RH. Практично, отримані результати дають змогу сформулювати для підприємств, що займаються помелом зерна кави і виробників жорнових кавомольних машин такі значення швидкості обертання жорен, часу помелу, вологості сировини, які забезпечать максимальну однорідність помелу при встановленій відстані між жорнами.

Висновки

Розглянуто задачу розроблення ситуаційної системи з нечіткою логікою для підвищення

ефективності та якості управління системами помелу зерна кави. Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

– вперше запропоновано використання ситуаційної системи з нечіткою логікою для визначення найкращого співвідношення між кількістю обертів валу двигуна, часом помелу, вологістю зерна кави для отримання найвищої однорідності помелу;

– отримала подальшого розвитку ситуаційна система з нечіткою логікою для вирішення нового кола задач контролю якості кінцевої продукції;

– вперше запропоновано структурну схему нечіткої моделі управління для задачі контролю якості помелу з урахування можливості проведення тестового контролю на першому рівні ІВС.

Практична цінність полягає у визначенні таких режимів роботи системи помелу зерна кави, що дозволяє отримати максимальну однорідність помелу. За допомогою графічного інтерфейсу користувача вдалося побудувати ССНЛ, яка надала можливість встановити для другого рівня ІВС, де формується технологічний і метрологічний «образ» об'єкта контролю з урахуванням впливу зовнішніх та внутрішніх факторів, необхідні технологічні режими, що позитивно вплинуть на однорідність помелу.

Перспективи подальших досліджень полягають у створенні ССНЛ для першого рівня ІВС, яка надасть можливість визначити параметри, що забезпечать мінімальне значення динамічної похибки системи помелу при відпрацюванні дії адитивних і мультиплікативних тестових впливів.

Список літератури

1. Напої нерозчинні на основі кави, цикорію та злакових. Загальні технічні умови: ДСТУ 4118-2002. [Чинний від 01.01.2002].
2. Кондрашов С. І. *Методи підвищення точності систем тестових випробувань електричних вимірювальних перетворювачів у робочих режимах*: монографія. Харків: НТУ «ХПІ», 2004. 224 с.
3. Григоренко І. В., Кондрашов С. І., Григоренко С. М. *Вступ в теорію систем*. Харків: Факт, 2021. 202 с.
4. Місяць В. П., Рубанка М. М., Демішонкова С. А. Система адаптивного керування приводом автоматичних кавових машин. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2021. №1. 293. С. 151–159. doi: 10.31891/2307-5732-2021-293-1-151-159.
5. Автоматизація процесів помелу. URL: <https://budtehnika.pp.ua/707-avtomatizatsiya-procesv-pomelu.html> (дата звернення: 01.08.2022).
6. Виробництво та виробничий процес. URL: <https://dcb.com.ua/uk/production> (дата звернення: 29.08.2022).
7. Чагін А. Д., Кулік Т. І., Гладчук О. З. Дослідження роботи двигуна жорнової кавомолки автоматичної кавомашини. *Технології та дизайн: Мехатроніка, комп'ютерна інженерія та метрологія*. 2019. № 2. 31. С. 1–10.
8. Кондрашов С. І. Підвищення точності вимірювальних перетворювачів з формуванням у реальних умовах

тестових впливів: дис. на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук: 05.11.05. Харків, 2004. 412 с.

9. Hrihorenko I., Tverytnykova E., Hrihorenko S., Drozdova T. Application of user interface Fuzzy Logic Toolbox for quality control of products and services. *Advanced information system, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*. 2019. Vol. 3, № 4. P. 118-125. doi: 10.20998/2522-9052.2019.4.18.
10. Sankar Ganesh S., Bhargav Reddy N., Arulmozhivarman P. Forecasting air quality index based on Mamdani fuzzy inference system. *2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI)*. 2017. Tirunelveli, India. doi: 10.1109/ICOEI.2017.8300944.
11. Mochammad Iswan Perangin-Angin, Andre Hasudungan Lubis, Imelda Sri Dumayanti, Raheliya Br. Ginting, Andysah Putera Utama Siahaan. Implementation of Fuzzy Tsukamoto Algorithm in Determining Work Feasibility. *Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*. 2017. Vol. 19, Issue 4. Ver. IV. P. 52-55. doi: 10.9790/0661-1904045255.
12. Michio Sugeno, Tomohiro Takagi. Multidimensional fuzzy reasoning. *Fuzzy Sets and Systems*. 1983. Vol. 9(1). P. 313-325. doi: 10.1016/S0165-0114(83)80030-X.
13. Kozhukhivskiy A. D., Kozhukhivska O. A. Developing a Fuzzy Risk Assessment Model for ERP – Systems (Tekst). *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2022. No. 1. P. 106–119. doi: 10.15588/1607-3274-2022-1-12.
14. Larsen H. L., Yager R. R. A framework for fuzzy recognition technology. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*. 2000. Vol. 30, Issue 1. P. 65–76. doi: 10.1109/5326.827455.
15. Wu H., Mendel J. M. On Choosing Models for Linguistic Connector Words for Mamdani Fuzzy Logic Systems. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*. 2004. Vol. 12. P. 29-44. doi: 10.1109/TFUZZ.2003.822675.

References (transliterated)

1. Napoyi nerozchynni na osnovi kavy, tsykoriyu ta zlakovykh. Zahalni tekhnichni umovy: DSTU 4118-2002. [Chynnyy vid 01.01.2002].
2. Kondrashov S. I. *Metody pidvyshchennya tochnosti system testovykh vyprobuvan elektrychnykh vymiryuvalnykh peretvoryuvachiv u robochykh rezhymakh*: monohrafiya. Kharkiv. NTU «KHPi», 2004. 224 p.
3. Hryhorenko I. V., Kondrashov S. I., Hryhorenko S. M. *Vstup v teoriyu system*. Kharkiv. Fakt, 2021. 202 p.
4. Misyats V. P., Rubanka M. M., Demishonkova S. A. Systema adaptivnoho keruvannya pryvodom avtomatychnykh kavovykh mashyn. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, 2021, 1, 293, pp. 151–159, doi: 10.31891/2307-5732-2021-293-1-151-159.
5. Avtomatyzatsiya protsesiv pomelu. Available at: <https://budtehnika.pp.ua/707-avtomatizatsiya-procesv-pomelu.html> (accessed 01.08.2022).
6. Vyrobnystvo ta vyrobnychy protses. Available at: <https://dcb.com.ua/uk/production> (accessed 29.08.2022).
7. Chahin A. D., Kulik T. I., Hladchuk O. Z. Doslidzhennya roboty dvyhuna zhornovoyi kavomolky avtomatychnoyi kavomashyny. *Tekhnolohiyi ta dyzayn: Mekhatronika, kompyuterna inzheneriya ta metrolohiya*, 2019, 2 (31), pp. 1–10.
8. Kondrashov S. I. Pidvyshchennya tochnosti vymiryuvalnykh peretvoryuvachiv z formuvanniam u realnykh umovakh testovykh vplyviv: dys. na zdobuttya naukovoho stupenya

- dok-tora tekhnichnykh nauk: 05.11.05. Kharkiv, 2004. 412 p.
9. Hrihorenko I., Tverytnykova E., Hrihorenko S., Drozdova T. Application of user interface Fuzzy Logic Toolbox for quality control of products and services. *Advanced information system, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*, 2019, Vol. 3, 4, pp. 118-125, doi: 10.20998/2522-9052.2019.4.18.
 10. Sankar Ganesh S., Bhargav Reddy N., Arulmozhivarman P. Forecasting air quality index based on Mamdani fuzzy inference system. *2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI)*, 2017, Tirunelveli, India, doi: 10.1109/ICOEI.2017.8300944.
 11. Mochammad Iswan Perangin-Angin, Andre Hasudungan Lubis, Imelda Sri Dumayanti, Raheliya Br. Ginting, Andysah Putera Utama Siahaan. Implementation of Fuzzy Tsukamoto Algorithm in Determining Work Feasibility. *Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, 2017, vol. 19, Issue 4, Ver. IV, pp. 52-55, doi: 10.9790/0661-1904045255.
 12. Michio Sugeno, Tomohiro Takagi. Multidimensional fuzzy reasoning. *Fuzzy Sets and Systems*, 1983, vol. 9(1), pp. 313-325, doi: 10.1016/S0165-0114(83)80030-X.
 13. Kozhukhivskiy A. D., Kozhukhivska O. A. Developing a Fuzzy Risk Assessment Model for ERP – Systems (Tekst). *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2022, No. 1, pp. 106–119, doi: 10.15588/1607-3274-2022-1-12.
 14. Larsen H. L., Yager R. R. A framework for fuzzy recognition technology. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2000, vol. 30, Issue 1, pp. 65–76, doi: 10.1109/5326.827455.
 15. Wu H., Mendel J. M. On Choosing Models for Linguistic Connector Words for Mamdani Fuzzy Logic Systems. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, 2004, vol. 12, pp. 29-44, doi: 10.1109/TFUZZ.2003.822675.

Відомості про авторів (About authors)

Сергій Іванович Кондрашов – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна. ORCID: 0000-0002-5191-8562. e-mail: Serhii.Kondrashov@khp.edu.ua

Serhii Kondrashov – Doctor of Sciences, Professor, Department of Information and Measuring Technologies and Systems National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» Kharkiv, Ukraine. ORCID: 0000-0002-5191-8562. e-mail: Serhii.Kondrashov@khp.edu.ua

Ігор Володимирович Григоренко – кандидат технічних наук, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна. ORCID: 0000-0002-4905-3053. e-mail: grigmaestro@gmail.com

Ihor Hryhorenko – PhD, Professor of the Department of information and measuring technologies and systems National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine. ORCID: 0000-0002-4905-3053. e-mail: grigmaestro@gmail.com.

Олександр Сергійович Опришкін – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна. e-mail: Aleksandr.Opryshkin@cit.khp.edu.ua

Aleksandr Opryshkin – Postgraduate student, Department of Information and Measuring Technologies and Systems National, Kharkiv, Ukraine. e-mail: Aleksandr.Opryshkin@cit.khp.edu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Кондрашов С. І., Григоренко І. В., Опришкін О. С. Розроблення ситуаційної системи з нечіткою логікою для другого рівня інформаційно-вимірювальної системи. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 24-34. doi:10.20998/2413-4295.2022.04.04.

Please cite this article as:

Kondrashov S., Hryhorenko I., Opryshkin O. Development of a situation system with fuzzy logic for the second level of the information and measurement system. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4 (14), pp. 24–34, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.04.

Надійшла (received) 03.12.2022

УДК 004.42

doi:10.20998/2413-4295.2022.04.05

РОЗРОБКА ТЕКСТОВОГО РЕДАКТОРА ДЛЯ ОПЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ UNIX

В. О. МЄТЄЛЬОВ*, О. М. МАРУСЕНКО, О. Р. БАСКАКОВ

кафедра комп'ютерного моделювання процесів та систем, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: volodymyr.mietielov@khpri.edu.ua

АНОТАЦІЯ Розглядається задача розробки та реалізації програмного додатку для створення, редагування, виведення на екран, а також збереження у вигляді файлів різного роду форматів, які у свою чергу будуть використовуватися у програмуванні на таких мовах як C, C++, Python, та системної мови Linux – Bash. Розроблений програмний додаток призначений для надання можливості користувачу взаємодії з файлами різного розширення, редагування та збереження змін, робота зі змістом файлів для подальшої розробки програмного коду на таких мовах, як C, C++, Python. Програмний додаток можливо використовувати як консольний додаток, так і з використанням графічного інтерфейсу на операційних системах UNIX та MS Windows. При розробці використовувалась операційна система UNIX, а саме дистрибутив Linux – Ubuntu, це надало змогу для використання створеного текстового редактора, на таких операційних системах як Ubuntu, Linux Mint, Kali Linux, Raspberry Pi Ubuntu. Також був використаний вільний кросплатформений мультимедійний пакет бібліотек – SFML, що надав змогу для використання текстового редактора на платформі MS Windows. Вихідний код бібліотеки SFML надається під ліцензійною угодою для розповсюдження вільного програмного забезпечення ZLIB/PNG License. Під час розробки визначено та реалізовано метод обробки вхідної інформації, а також збереження у файл окремого формату. Були використані наступні мови програмування: C, C++11, розроблена зручна архітектура програмного додатку, яка дозволяє з легкістю підтримувати та удосконалювати програму у майбутньому. Використання віртуальної машини для проекту було невід'ємною складовою. Через використання віртуальної машини, багато ресурсів комп'ютера утилізується, наприклад, оперативна пам'ять, кількість ядер, сховище даних та дискретне прискорення робочого стола у бажаній операційній системі. Реалізовано дружній графічний інтерфейс для взаємодії із користувачем.

Ключові слова: операційні системи; текстовий редактор; UNIX; Windows; бібліотека SFML; Bash; C++

DEVELOPMENT OF A TEXT EDITOR FOR UNIX OPERATING SYSTEM

V. MIETIELOV*, O. MARUSENKO, O. BASKAKOV¹

Department of Computer Modeling of Processes and Systems, NTU "KhPI," Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The task of developing and implementing a software application for creating, editing, displaying on the screen, as well as saving in the form of files of various formats, which in turn will be used in programming in languages such as C, C++, Python, and the Linux system language – Bash, is being considered. The developed software application is designed to enable the user to interact with files of various extensions, edit and save changes, work with the content of files for further development of software code in languages such as C, C++, Python. The software application can be used both as a console application and with the use of a graphical interface on UNIX and MS Windows operating systems. During development, the UNIX operating system was used, namely the Linux – Ubuntu distribution, which made it possible to use the created text editor on such operating systems as Ubuntu, Linux Mint, Kali Linux, Raspberry Pi Ubuntu. A free cross-platform multimedia package of libraries – SFML was also used, which made it possible to use a text editor on the MS Windows platform. The source code of the SFML library is provided under the ZLIB/PNG Free Software Distribution License. During development, a method of processing input information, as well as saving it in a file of a separate format, was defined and implemented. The following programming languages were used: C, C++11, a convenient software application architecture was developed, which allows you to easily maintain and improve the program in the future. The use of a virtual machine was an integral part of the project. By using a virtual machine, many computer resources are utilized, such as: RAM, number of cores, data storage and discrete desktop acceleration in the desired operating system. A friendly graphical interface for user interaction has been implemented.

Keywords: operating systems; text editor; UNIX; Windows; SFML library; Bash; C++

Вступ

Текстові редактори [1] різняться за своїм призначенням, складністю, функціональними можливостями. Зручні та компактні у розмірі програмні редактори, мають високу популярність серед системних менеджерів, адміністраторів і програмістів.

Швидкість та змога редактора працювати зі специфікаціями (кожна операційна система має свої допоміжні механізми для роботи з даними та

файлами) операційної системи є майже головним фактором у виборі програмного продукту для менеджменту файлів та їх вмісту.

Використання такої мови як C++ надає змогу для реалізації як швидкого, так і чітко структурованого програмного рішення. Мови C та C++ мають особливі механізми для роботи з файловою системою операційних систем як Microsoft Windows, так і систем Linux, а саме управління щонайменше кожним бітом (1 bit), та виділення чітко необхідної купи сторінок, віртуальної оперативної

пам'яті (як правило використовуються сторінки розміром у 4 кілобайта (4 Kb) для подальшого контролю створення файлів.

У роботі програмний додаток створювався на базі операційної системи Linux, а саме – дистрибутиву Linux–Ubuntu [2]. Це надало змогу для використання створеного текстового редактора на таких ОС як Ubuntu, Linux Mint, Kali Linux, Rasperry Pi Ubuntu. Також був використаний пакет бібліотек – SFML, що надав змогу для використання програми на платформі MS Windows. Вихідний код бібліотеки SFML надається під ліцензією ZLIB/PNG License.

Для початку роботи у програмі необхідно її викликати, це можливо зробити як за допомогою ярлика (icon, link) самого редактора, так і за допомогою терміналу Linux. Саме використання редактора через термінал надає змогу для утилізації такого функціоналу як транспортування виводу системних додатків (pipe, “|” – синтаксис написання у терміналі). Такого роду функціонал дуже популярний серед системних програмістів складних систем та автоматизації виконання завдань.

Мета роботи

Мета цієї роботи – розробка та реалізація програмного додатку для створення, редагування, виведення на екран, а також збереження у вигляді файлів різного роду форматів, які у свою чергу будуть використовуватися у програмуванні на таких мовах як C, C++, Python, та системної мови Linux-Bash.

Розроблений текстовий редактор сумісний з операційною системою на базі UNIX–Linux Ubuntu, Linux Mint, Kali Linux. Також, для сумісності програмного рішення з операційними системами Microsoft Windows використана мультимедійна бібліотека SFML, яка у свою чергу є простим платформним шаром над Win32 API, Linux Core.

Розроблена програма працює як консольний додаток, так і як самостійний виконний модуль із самостійним інтерфейсом.

Виклад основного матеріалу

У роботі використана операційна система MS Windows, як головна система для написання редактора на UNIX системи. Зручний механізм використання віртуальної машини із дистрибутивом Linux Ubuntu, дозволяє тестувати роботу текстового редактора, як на MS Windows, так і на Linux системах.

Вибір дистрибутиву Linux Ubuntu має логічне пояснення, а саме те, що ця ОС гарно підтримується розробниками та має більше користувачів цієї ОС, ніж інших дистрибутивів. Якщо програмний додаток працює на Linux Ubuntu, то програма буде працювати і на таких системах як Kali Linux, Linux Mint, RasperryPi Ubuntu.

Використання компілятора GCC/C++ [3,4] є рішенням схожості його до системного компілятора

на платформі MS Windows. Тоді як GCC та MS VCVARSAALL схожі, редактор буде компілюватися майже однаково для двох операційних систем.

SFML – це не є набір готових рішень для побудови програм [5,6]. Ця бібліотека має одне призначення, а саме, бути платформним шаром між операційною системою (ОС) і програмістом, який не бажає витратити час, або не знає про системне програмування. Функціонал даної бібліотеки допомагає уникати складних конструкцій при програмуванні рішення.

Мова C/C++ була вибрана не випадково, тому що саме на цій мові написані ОС MS Windows та Linux. Через це бібліотека SFML також розроблена на мові C++. Також використання гарного, вбудованого функціоналу мови C, а саме робота з даними, побітовий здвиг, якщо необхідно, маніпуляція з файлами будь-якого формату – має велике значення для проекту текстового редактора.

Опис роботи текстового редактора має декілька етапів. Розділи програмного коду, з яких буде складатися опис: головної функції main; робота редактора з консолі; робота вікна у ОС; навігація у додатку.

Стисла робота головної функції main представлена нижче:

- робота програми розпочинається зі зчитування аргументів із терміналу за допомогою атрибутів;
- для відображення робочого вікна надаємо наступні параметри: розмір вікна, колір та назва вікна, як заголовок;
- створення екземпляра класу TextDocument для подальшої праці із редагуванням файла;
- створення екземпляра класу EditorContent – класу навігації;
- ініціюємо функціонал класу InputController – клас прийому контролю для додатка;
- виконується запис у файл.

Основні функції роботи текстового редактора у консолі не відрізняються від роботи програми з графічним інтерфейсом. За окремістю того, що нам не треба обробляти роботу GUI, і за нас це робить операційна система.

Весь функціонал для роботи як консольного додатку (рис. 1) надає операційна система UNIX [7–11].

Якщо розглядати роботу вікна у операційній системі Linux Ubuntu та MS Windows, вони будуть дуже сильно відрізнятися, як на програмному рівні самого API, так і на рівні роботи системного коду. Наприклад, для програмування інтерфейса в ОС Linux як правило використовується X11 Server API, тому що Linux має зовсім інші системні «сигнали», та документація для API не надасть зрозумілості, якщо описувати роботу текстового редактора на ОС Linux. Для абстрактності опис роботи надано на рівні SFML та системних викликів із під ОС MS Windows, яка має більш прозорий API і документацію.

```

dude@dude-VirtualBox: ~/Desktop
struct{
  int pixel;
}RGB_p;

static int*
Get_pixel_array(int p_count)
{
  int* pixel_array = 0;
  int temp_array[p_count] = { };
  pixel_array = temp_array;
  return pixel_array;
}

int
main ()
{
  Get_pixel_array(0);
return 0;
}
test.cpp - 19 lines
HELP: Ctrl-S = save | Ctrl-Q = quit | Ctrl-F = fnd
  
```

Рис. 1 – Редагування програмного коду в редакторі Bytecode

Робота головного вікна редактора розпочинається зі створення самого вікна. У програмному коді можна побачити, що ми вказуємо як розмір вікна, так і ім'я. Ім'я – дуже важливий атрибут, бо він не тільки відповідає за «розпізнавання користувачем», а і за системні виклики. Для того щоб ОС могла відрізняти різні, непов'язані між собою програми, вона використовує так звану таблицю імен та ID.

Для оновлення вікна (window repaint), використано стандартну конструкцію роботи ведучої функції main (рис. 2).

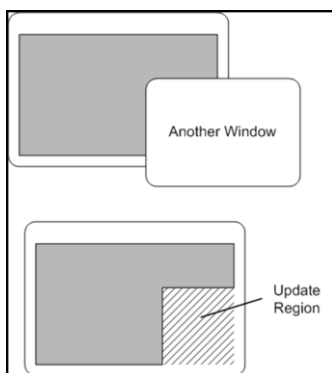


Рис. 2 – Неповне оновлення вікна

Очищення, малювання нового контенту у буфер обміну та відображення нового контенту на екран монітора – це і є стандартний функціонал кожного програмного рішення. Схема, за якою працює текстовий редактор Bytecode така сама (рис. 3).

Можна побачити, що наше програмне вікно не постійно оновлюється без нового контенту або розміру вікна. Завдяки системним сигналам від MS Windows є змога вирахувати зону оновлення вікна, щоб не оновлювати весь інтерфейс, це заощадує ресурси комп'ютера. Також вікно працює за частотою 60 Hz при допомозі VSync технології. Це було зроблено для того, щоб не витратити «процесорний час» та не «перегрівати ЦП».

Наведемо принцип роботи редактора Bytecode з інтерфейсом (рис. 4).

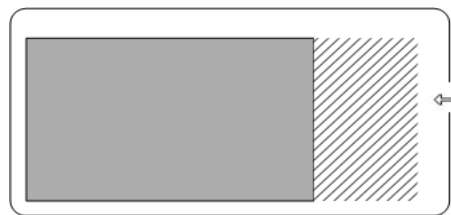


Рис. 3 – Оновлення у разі змінення розміру вікна

```

Bytecode
1 The sample file created with text bytecode text editor
2
3 Using this bytecode editor you can write
4 changes to destination files.
5
6 Simple and light editor can be used as both
7 - console and gui code editor
8
9 This sample bf the test text will be saved
10 in txt/Savedfile.cpp
11
12 You can load this file later using the same editor - bytecode:)
  
```

Рис. 4 – Вікно редактора з надрукованим текстом

Процес навігації відбувається за двома послідовностями, а саме за логічною навігацією та програмною. Під логічною навігацією розуміється відстежування індексації кожного пікселя у вікні, курсора, контенту символьних масивів.

Програмна навігація – це те, що було описано раніше, відображення курсора на екрані монітора, оновлення тексту на моніторі та інше. Знаючи на логічному рівні де знаходиться курсор (а ми зберігаємо його дані позиції X та Y), та знаючи висоту і ширину символів у пікселях є змога намалювати курсор у вікні користувача. Такий принцип стосується і всього іншого, що несе в собі редактор Bytecode.

Навігація у редакторі, одне із головних функціоналів, яким повинен володіти редактор програмного коду. Наведемо скріншоти роботи даного функціоналу у редакторі Bytecode (рис. 5–6).

На діаграмі діяльності (рис. 7) показано послідовність актів дій системи на основі діяльності. Діаграми діяльності подібні до процедурних діаграм потоку, але відрізняються від них тим, що діяльності точно прив'язано до об'єктів.

Опис послідовності кожного акту у діаграмі діяльності:

– робота програми розпочинається зі зчитування аргументів із терміналу за допомогою атрибутів головної функції main, а саме argc, argv. Зчитавши ім'я бажаного для відкриття файлу, розпочинаємо роботу текстового редактора;

– для відображення робочого вікна, у якому буде працювати користувач, використовуємо функціонал бібліотеки SFML, а саме починаємо будувати вікно. Запросивши екземпляр вікна з бібліотеки SFML, надаємо наступні параметри: розмір вікна, колір, та назва вікна, як заголовок;

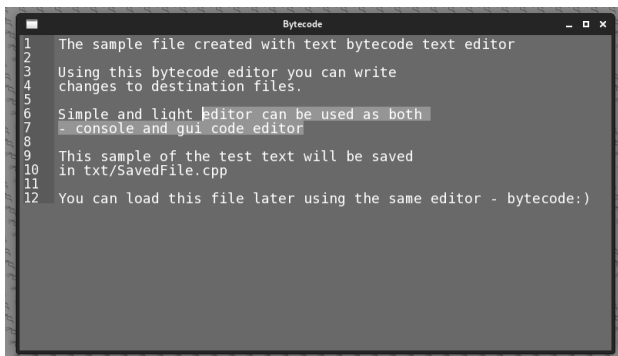


Рис. 5 – Виділення надрукованого тексту у редакторі Bytecode

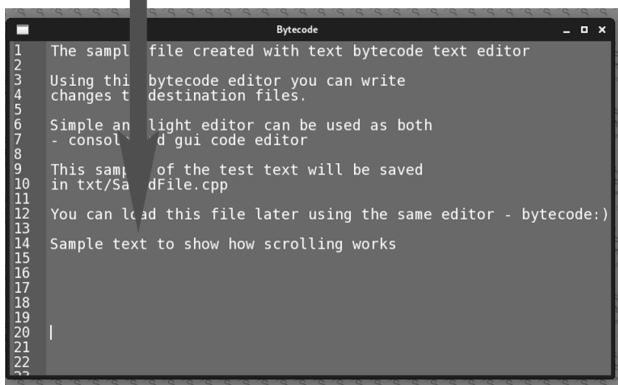
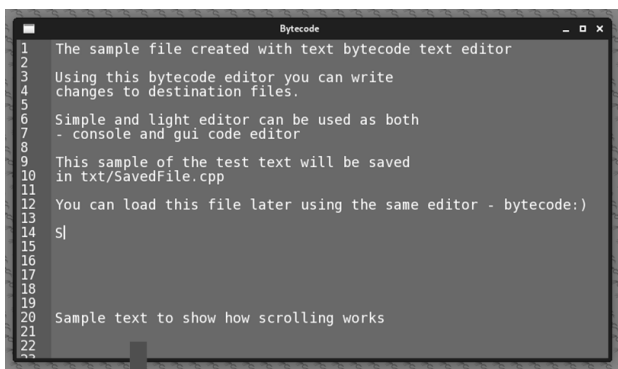


Рис. 6 – Переміщення виділених строк тексту

- створення екземпляра класу TextDocument для подальшої роботи із редагуванням файлу;
- створення екземпляра класу EditorContent – це є обов’язковим, бо цей клас має важливе значення для функціоналу самого редактора. Навігація, відображення, зчитування позиції курсора, виділення тексту – саме за це відповідає цей екземпляр;
- пов’язуємо наш інтерфейс редактора із функціоналом, передаючи у клас EditorView, EditorContent. Клас EditorView відповідає за відображення на екрані загальної програми;
- ініціюємо функціонал класу InputController. Це дуже важливий клас, бо він відповідає не тільки за зчитування тексту з клавіатури, а і за чергу системних повідомлень від редактора. Наприклад, якщо розглядати роботу редактора у MS Window, системні повідомлення є головним, із-за чого працює

операційна система MS Windows. Такі системні повідомлення як WM_DESTROY, WM_CLOSE, WM_RESIZE, WM_DRAW та багато інших – лише вони контролюють віконні рішення;

– при натисканні клавіш для збереження змін даних робимо запис файлу або створення його, якщо файл до цього не існував;

– закриття текстового редактора з подальшим звільненням ресурсів робочого вікна редактора.

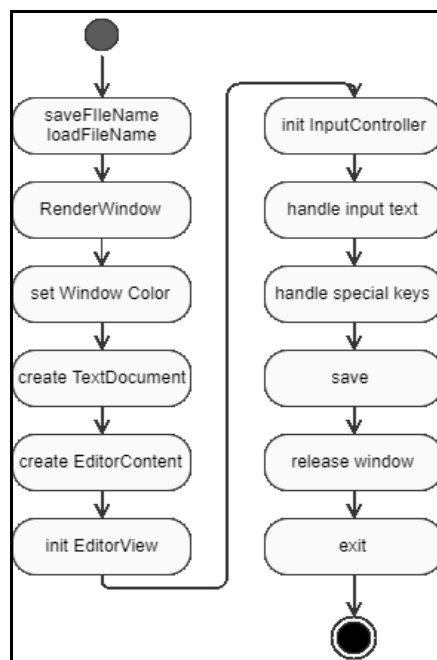


Рис. 7 – Діаграма діяльності

Тестування базувалось на функціональному підході [12–14], дане тестування взаємодіє з іншими системами, і може бути представлено на всіх рівнях тестування. Використання даного типу тестування носить у собі більш практичний підхід до виконання роботи. За таким типом тестування можливо проробити усі сценарії (функціонал, логіку функціоналу) використання з точки зору користувача програмного рішення.

Обговорення результатів

Редактор коду Bytecode – побудований за всіма принципами сучасного об’єктно орієнтованого програмування, що надає змогу проведення як функціонального тестування, так і опису загальної структури за допомогою UML діаграм.

Розробка цього програмного рішення мала більш практичний характер, а саме наведення сутності використання, якомога менше сторонніх бібліотек і використання сучасного системного програмування. Використання великої кількості сторонніх бібліотек є проблемою у сучасному програмуванні, бо за такою структурою важко описати дії програми та побудувати прозорий алгоритм дії.

Провівши тестування редактора на функціонал та сумісність із різними ОС, можна помітити, що основним вимогам редактор повністю відповідає (табл. 1).

Таблиця 1 – Перевірка роботи редактора на сумісність в ОС

Операційна система	GCC 4.9.2 Windows	GCC 4.x.x Linux	Visual C++ 12
Linux Ubuntu	-	+	-
Linux Mint	-	+	-
Kali Linux	-	+	-
MS Windows 10	+	-	+
MS Windows 8	+	-	+
MS Windows 7	+	-	+

Такий функціонал як відображення на екран та редагування програмного тексту пройшов тестування на обох операційних системах: UNIX та MS Windows.

Збереження у файл – працюючий функціонал, який був побудований на базі можливостей мови C/C++. Маючи такі функції як побітове зчитування з документу, мова C/C++ вирішує проблему використання сторонніх технологій та включення бібліотек, які більш виконують роль абстракції і не завжди несуть оптимізований програмний код.

Задля використання редактора на відповідній ОС, потрібно мати сумісні технології для компілювання текстового редактора Bytecode. За табл. 1 можна побачити, що використання одного і того ж компілятора не є вирішенням проблеми роботи редактора на обох операційних системах. Використання задокументованого компілятора, допоможе уникнути втрати функціоналу або взагалі повної роботоздатності програми. Сумісні версії компіляторів можна, наприклад, перевірити на сайті бібліотеки SFML.

Висновки

У даній роботі розглядалась задача розробки текстового редактора для змінення та збереження інформації.

За результатами виконання роботи:

- реалізовано базовий функціонал редактора (збереження, змінення);
- реалізовано сумісність редактора з різними операційними системами;
- розроблено як графічний, так і консольний інтерфейс програми;
- розроблена спеціальна архітектура програмного забезпечення, яка дозволяє підтримувати та удосконалювати програмне забезпечення у майбутньому;
- реалізовано простий і зрозумілий інтерфейс;
- результати роботи програмного забезпечення були протестовані для різних вхідних даних.

Були використані наступні мови програмування: C, C++11.

Визначено та реалізовано метод обробки вхідної інформації, а також збереження у файл окремого формату. Розроблена зручна архітектура програмного забезпечення, яка дозволяє з легкістю підтримувати та удосконалювати програму у майбутньому. Реалізовано дружній графічний інтерфейс для взаємодії з користувачем.

Список літератури

1. Duffy Michael D. Chapter 13 - Text Editors. Getting Started with OpenVMS, edited by Michael D. Duffy. *Digital Press*. 2003. P. 167–175. doi:10.1016/B978-155558279-1/50014-2.
2. Kidwai Abdullah, et al. A Comparative Study on Shells in Linux: A Review. *Materials Today: Proceedings*. Jan. 2021. Vol. 37. P. 2612–16. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.508.
3. Smith David W. Chapter 2 - First C Program. PIC Projects and Applications Using C (Third Edition), edited by David W. Smith. *Newnes*. 2013. P. 5–34. doi: 10.1016/B978-0-08-097151-3.00002-7.
4. Dai Peng, et al. An Improving Approach to Analyzing Change Impact of C Programs. *Computer Communications*. Jan. 2022. Vol. 182. P. 60–71. doi: 10.1016/j.comcom.2021.10.039.
5. Kang Kyuchang, et al. SFML: Screening Form Markup Language for Healthcare Service. *2012 14th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. 2012. P. 1284–88.
6. Clercq Anton le and Kristoffer Almroth. *Comparison of Rendering Performance Between Multimedia Libraries Allegro, SDL and SFML*. 2019. 52 p.
7. Khawaja Gus. Linux Privilege Escalation. Kali Linux Penetration Testing Bible. *Wiley*. 2021. P. 257–272. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Kali+Linux+Penetration+Testing+Bible-p-9781119719083>.
8. Xiao Guanping, et al. Evolution of Linux Operating System Network. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. Jan. 2017. Vol. 466. P. 249–58. doi: 10.1016/j.physa.2016.09.021.
9. Bourne Kelly C. Chapter 25 - Linux Tools. *Application Administrators Handbook*, edited by Kelly C. Bourne, *Morgan Kaufmann*. 2014. P. 457–63. doi: 10.1016/B978-0-12-398545-3.00025-X.
10. Beuchelt Gerald. Chapter 11 - UNIX and Linux Security. *Computer and Information Security Handbook (Third Edition)*, edited by John R. Vacca, *Morgan Kaufmann*. 2017. P. 205–24. doi: 10.1016/B978-0-12-803843-7.00011-9.
11. Abbott Doug. Chapter 3 - Introducing Linux. *Linux for Embedded and Real-Time Applications (Fourth Edition)*, edited by Doug Abbott, *Newnes*. 2018. P. 29–54. doi: 10.1016/B978-0-12-811277-9.00003-1.
12. Baresi Luciano and Mauro Pezzè. An Introduction to Software Testing. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*. Feb. 2006. Vol. 148, no. 1. P. 89–111. doi: 10.1016/j.entcs.2005.12.014.
13. Howden William E. Functional Testing and Design Abstractions. *Journal of Systems and Software*. Jan. 1979. Vol. 1. P. 307–13. doi: 10.1016/0164-1212(79)90032-3.
14. Garousi Vahid, et al. Software-Testing Education: A Systematic Literature Mapping. *Journal of Systems and Software*. July 2020. Vol. 165. P. 110570. doi: 10.1016/j.jss.2020.110570.

References (transliterated)

1. Duffy Michael D. Chapter 13 - Text Editors. Getting Started with OpenVMS, edited by Michael D. Duffy. *Digital Press*, 2003, pp. 167–175, doi:10.1016/B978-155558279-1/50014-2.
2. Kidwai Abdullah, et al. A Comparative Study on Shells in Linux: A Review. *Materials Today: Proceedings*, Jan. 2021, vol. 37, pp. 2612–16, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.508.
3. Smith David W. Chapter 2 - First C Program. PIC Projects and Applications Using C (Third Edition), edited by David W. Smith. *Newnes*, 2013, pp. 5–34, doi: 10.1016/B978-0-08-097151-3.00002-7.
4. Dai Peng, et al. An Improving Approach to Analyzing Change Impact of C Programs. *Computer Communications*, Jan. 2022, vol. 182, pp. 60–71, doi: 10.1016/j.comcom.2021.10.039.
5. Kang Kyuchang, et al. SFML: Screening Form Markup Language for Healthcare Service. *2012 14th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. 2012, pp. 1284–88.
6. Clercq Anton le and Kristoffer Almroth. *Comparison of Rendering Performance Between Multimedia Libraries Allegro, SDL and SFML*. 2019, 52 p.
7. Khawaja Gus. Linux Privilege Escalation. Kali Linux Penetration Testing Bible. *Wiley*, 2021, pp. 257–272. Available at: <https://www.wiley.com/en-us/Kali+Linux+Penetration+Testing+Bible-p-9781119719083>.
8. Xiao Guanping, et al. Evolution of Linux Operating System Network. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Jan. 2017, vol. 466, pp. 249–58, doi: 10.1016/j.physa.2016.09.021.
9. Bourne Kelly C. Chapter 25 - Linux Tools. *Application Administrators Handbook*, edited by Kelly C. Bourne, *Morgan Kaufmann*, 2014, pp. 457–63, doi: 10.1016/B978-0-12-398545-3.00025-X.
10. Beuchelt Gerald. Chapter 11 - UNIX and Linux Security. *Computer and Information Security Handbook (Third Edition)*, edited by John R. Vacca, *Morgan Kaufmann*, 2017, pp. 205–24, doi: 10.1016/B978-0-12-803843-7.00011-9.
11. Abbott Doug. Chapter 3 - Introducing Linux. *Linux for Embedded and Real-Time Applications (Fourth Edition)*, edited by Doug Abbott, *Newnes*, 2018, pp. 29–54, doi: 10.1016/B978-0-12-811277-9.00003-1.
12. Baresi Luciano, and Mauro Pezzè. An Introduction to Software Testing. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, Feb. 2006, vol. 148, no. 1, pp. 89–111, doi: 10.1016/j.entcs.2005.12.014.
13. Howden William E. Functional Testing and Design Abstractions. *Journal of Systems and Software*, Jan. 1979, vol. 1, pp. 307–13, doi: 10.1016/0164-1212(79)90032-3.
14. Garousi Vahid, et al. Software-Testing Education: A Systematic Literature Mapping. *Journal of Systems and Software*, July 2020, vol. 165, p. 110570, doi: 10.1016/j.jss.2020.110570.

Відомості про авторів (About authors)

Метельов Володимир Олександрович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2633-6296>; e-mail: volodymyr.mietielov@khp.edu.ua.

Mietielov Volodymyr – Ph. D., Associate Professor of the Department of Computer Modelling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2633-6296>; e-mail: volodymyr.mietielov@khp.edu.ua.

Марусенко Олексій Миколайович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6911-2500>; e-mail: Oleksii.Marushenko@khp.edu.ua.

Marushenko Oleksii – Assistant of the Department of Computer Modelling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6911-2500>; e-mail: Oleksii.Marushenko@khp.edu.ua.

Баскаков Олександр Романович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; e-mail: baskakovforjob@gmail.com.

Baskakov Oleksandr – Student of the Department of Computer Modelling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: baskakovforjob@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Метельов В. О., Марусенко О. М., Баскаков О. Р. Розробка текстового редактора для операційної системи UNIX. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 35-40. doi:10.20998/2413-4295.2022.04.05.

Please cite this article as:

Mietielov V., Marushenko O., Baskakov O. Development of a text editor for UNIX operating system. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4(14), pp. 35–40, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.05.

Надійшла (received) 02.12.2022

УДК 004.42

doi:10.20998/2413-4295.2022.04.06

РОЗРОБКА ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАУКОВИХ ТЕКСТОВИХ ДОКУМЕНТІВ, ЗДАТНОГО ПРАЦЮВАТИ З КІЛЬКОМА ОПЕРАЦІЙНИМИ СИСТЕМАМИ

В. О. МІТЕЛЬОВ*, О. М. МАРУСЕНКО, Г. Ю. БРОДСЬКИЙ

кафедра комп'ютерного моделювання процесів та систем, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: volodymyr.mietelov@khpri.edu.ua

АНОТАЦІЯ У роботі спроектовано, розроблено та реалізовано кросплатформений застосунок для отримання інформації з репозитарію, коректному її відображенню, генерації опису джерел інформації в різних стилях, а також для відкриття документа у кросплатформеному додатку. При розробці була використана операційна система MS Windows 11, мова програмування Dart та фреймворк Flutter. Оптимізація роботи програми забезпечувалась шляхом використання архітектури Flutter BloC, це дозволило структурувати код, відокремити інтерфейс від логіки і наочно описати роботу програми залежно від різних станів. Вхідними даними є інформація про наукову роботу у репозитарії, тобто запит користувача у полі пошуку у вигляді посилання. Результатом роботи є: список оброблених посилань, опис джерел інформації у різних стилях, документ наукової роботи, посилання для відкриття в браузері. У кросплатформений додаток додано інструкцію, що містить всю необхідну інформацію про основні аспекти роботи додатку. Також була створена сторінка, на якій користувачі можуть отримати необхідну допомогу або повідомити про проблеми у роботі додатку. Тестування додатку виконувалось на пристрої на базі операційної системи Android 11 та вище, пристрої на базі операційної системи iOS та веб-браузер. Для запуску на пристрої на базі Android потрібно встановити apk-файл і запустити програму, для запуску на пристрої на базі iOS потрібно встановити програму за допомогою будь-якого середовища розробки. Для запуску у веб-браузері, знадобиться запуск із середовища розробки. Усі ці функції роблять додаток актуальним для використання студентами та викладачами у створенні наукових, дипломних, дослідницьких робіт. А також для ознайомлення з останніми дослідженнями колег у великій кількості областей. Кросплатформений додаток дозволяє швидко і зручно отримати всю доступну інформацію про роботу, а також переглянути саму роботу на своєму девайсі без використання сторонніх програм.

Ключові слова: операційні системи; кросплатформений додаток; Dart; Flutter; список літературних джерел; Android; iOS

DEVELOPMENT OF AN APPLICATION FOR THE ANALYSIS AND RESEARCH OF THE PARAMETERS OF SCIENTIFIC TEXT DOCUMENTS CAPABLE OF WORKING WITH SEVERAL OPERATING SYSTEMS

V. MIETIELOV, O. MARUSENKO, G. BRODSKIY

Department of Computer Modeling of Processes and Systems, NTU "KhPI," Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT In the work designed, developed and implemented a cross-platform application for retrieving information from the repository, displaying it correctly, generating a description of references in various styles, as well as for opening a document in a cross-platform application. The MS Windows 11 operating system, the Dart programming language and the Flutter framework were used in the development. The optimization of the program was ensured by using the Flutter BloC architecture, it allowed to structure the code, separate the interface from the logic and visually describe the operation of the program depending on various states. The input data is information about the scientific work in the repository, the user's request in the search field is in the form of a link. The result of the work is: a list of processed links, a description of references in different styles, a document of a scientific work, a link for opening in a browser. Instructions containing all the necessary information about the main aspects of the application have been added to the cross-platform application. A page was also created where users can get the necessary help or report problems with the application. The application was tested on devices based on the Android 11 operating system and above, devices based on the iOS operating system, and a web browser. To run on an Android-based device, you need to install an apk file and run the app, to run on an iOS-based device, you need to install the app using any development environment. To run in a web browser, you will need to run from the development environment. All these functions make the application relevant for use by students and teachers in the creation of scientific, diploma, and research works. And also to get acquainted with the latest research of colleagues in a large number of areas. The cross-platform application allows you to quickly and conveniently get all available information about work, as well as view the work itself on your device without using third-party programs.

Keywords: operating systems; cross-platform application; Dart; Flutter; references; Android; iOS

Вступ

Сучасна людина робить все що може для того, щоб досягти максимального комфорту. Сьогодні одним із бажань більшості людей є вихід до Інтернету. До того ж, вони завжди хочуть залишатися онлайн. Саме через це величезною актуальністю користується така

послуга як розробка кросплатформених додатків. Усе це стало актуальним разом із появою мобільного Інтернету. Під час подорожей завжди можна підключитися до мережі за допомогою планшета, телефона або іншого пристрою. Але, відразу ж варто відзначити, що без спеціальних додатків навряд чи було б досягнуто необхідної ефективності.

Сьогодні спеціалістами у галузі інформаційних технологій розробляються мобільні додатки, які дозволяють вирішувати величезну кількість завдань. Деякі служать для встановлення з'єднання з мережею, інші допомагають добре оптимізувати маршрут. Треті призначені для тих, хто цікавиться найвигіднішими магазинами. Є й такі, за допомогою яких можна замовити додому їжу. В основу кожної з таких програм лягли певні утиліти, які дозволяють швидко вирішувати поставлене завдання, економити час і досягати максимально комфортного рівня життя.

Усі мобільні програми умовно можна розділити на програми для робочих цілей та на розважальні програми. Перші дозволяють офісним працівникам та бізнесменам контролювати бізнес-процеси, складати аналітичні звіти, виконувати такі завдання, розробку дизайну фірмового стилю. Другі включають різні ігри, додатки для перегляду фільмів і прослуховування музичних творів, засоби для спілкування тощо. Кожен з мобільних додатків знаходить свого споживача, однак, як відзначають фахівці, найбільш популярним є спеціалізоване програмне забезпечення, наприклад, для створення фірмового стилю, необхідне компаніям, що працюють у різних напрямках.

За останні декілька років показники, що характеризують рівень попиту на мобільні пристрої, невинно зростають. За допомогою такої статистики можна зробити висновок про те, що розробка мобільних програм та кросплатформених додатків актуальна і доцільна.

У роботі розроблений кросплатформений додаток [1], корисний не тільки для викладачів, а й для студентів. Інтерфейс програми інтуїтивно зрозумілий та простий. Інформація, отримана з репозитарію, зберігається у зручному вигляді та відображається списком. Отриману інформацію можливо видалити зі списку. При натисканні на блок інформації відкривається сторінка з усіма доступними даними про наукову роботу. Також наявні кнопки, що дозволяють відкрити сторінку наукової роботи у браузері, відкрити наукову роботу всередині додатку і відкрити сторінку з описом джерел інформації у різних стилях.

Мета роботи

Метою створення мобільного застосунку є проектування, розробка та реалізація кросплатформеного застосунку [2–8] для отримання інформації з репозитарію, коректному її відображенні, генерації опису джерел інформації у різних стилях, а також для відкриття документа у додатку.

Додаток може бути використаний на різних операційних системах (Android, MacOS, Windows, iOS, Linux). При розробці додатку була використана операційна система Windows 11 та MacOS 11.5.2, мова програмування Dart та її фреймворк: Flutter 3.0 [9–12].

У додаток додано інструкцію для користування. Ця інструкція має всю необхідну інформацію про основні аспекти роботи програми, а також має графічні об'єкти, які відображають роботу.

Також була створена сторінка, на якій користувачі можуть отримати необхідну допомогу або повідомити про проблеми у роботі додатку. Посилання на сторінці є клікабельними. При натисканні на кнопку пошти користувач автоматично переміщується у встановлену поштову програму на своєму телефоні, де відкривається новий лист із заповненим відправником. При натисканні на посилання Telegram – облікового запису, автоматично відкривається сторінка браузера з посиланням для відкриття в однойменному додатку.

Виклад основного матеріалу

При запуску додатку віджет Main формує AppBar з текстом і кнопкою, яка викликає меню. Після цього викликається віджет HomePage, який формує вікно введення тексту, кнопку Add, а також порожній список (рис. 1).

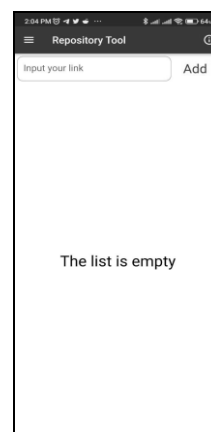


Рис. 1 – Вид програми при запуску

При введенні посилання в меню введення тексту та натисканні кнопки Add, програма звертається до функції GetInfo, яка отримує введене посилання, парсить її HTML-сторінку і повертає її до додатку. Записує отриманий HTML-текст у змінну document. Після цього відбувається парсинг ключових елементів сторінки за класом і запис у відповідні змінні. Далі інформація у змінних проходить обробку, інформація набуває потрібного вигляду, після чого створюється екземпляр заздалегідь підготовленого класу, що дозволяє створити один об'єкт. Це дозволяє зручно передавати велику кількість інформації назад у віджет Main, який при отриманні інформації додає екземпляр класу у список і формує новий набір віджетів (рис. 2).

Тривале натискання на набір віджетів копіює опис джерела інформації у стилі ДСТУ 2015 у буфер обміну. Коли ви проводите пальцем ліворуч або праворуч, набір віджетів видаляється зі списку. Коли ви обираєте набір віджетів, відкривається нове вікно з повним списком інформації, доступної у сховищі (рис.3).

Крім того, вікно має чотири активні кнопки, кожна з яких виконує певну дію.

Інші стандарти джерел – відкриває нове вікно, яке представляє кілька віджетів, що містять сформований опис джерела інформації за певним стилем (рис. 4).



Рис. 2 – Доданий до списку сформований набір віджетів



Рис. 5 – Вікно з відкритим документом, запрошеним з репозитарію



Рис. 3 – Повна інформація, отримана з репозитарію

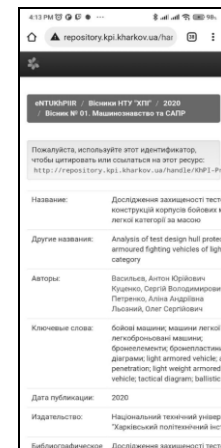


Рис. 6 – Вікно з відкритим у браузері пристрою посиланням на репозитарій



Рис. 4 – Вікно із сформованими описами джерел інформації в різних стилях

Відкрити PDF – відкриває PDF-документ, що містить статтю з потрібного сховища. Також на цій сторінці є дві кнопки, одна з яких закриває це вікно, а інша дозволяє завантажити статтю на свій пристрій (рис. 5).

Відкрити у браузері – відкриває необхідну сторінку сховища у браузері пристрою (рис. 6).

Закрити – закрити цю сторінку та повернутися на Головний екран.

При натисканні на кнопку у верхньому лівому куті AppBar-а відкривається меню програми (рис. 7), яке дозволяє переміщатися між основними вікнами мобільної програми.

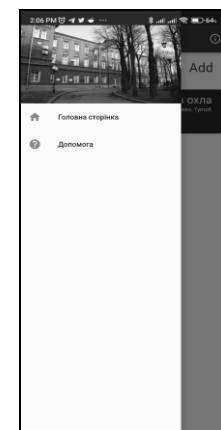


Рис. 7 – Меню мобільного додатку

Кнопка Головна сторінка відповідає за вихідне вікно, у якому ми запитуємо інформацію з репозитарію, Кнопка Допомога відповідає за вікно, у якому надана інформація про ресурси, за допомогою

яких можна зв'язатися з розробником мобільного додатка та задати питання про роботу програми або запропонувати нововведення.

При натисканні у верхньому правому куті відкривається інструкція користування (рис. 8), що містить текстовий та графічний опис роботи з додатком.

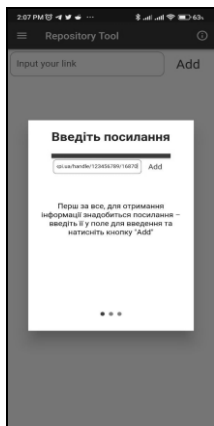


Рис. 8 – Інструкція користування програмою

Тестування додатку виконувалось на пристрої на базі операційної системи Android 11 та вище, пристрої на базі операційної системи iOS та веб-браузер.

Для запуску на пристрої на базі Android, потрібно встановити арк-файл і запустити програму, для запуску на пристрої на базі iOS, потрібно встановити програму за допомогою будь-якого середовища розробки.

Для запуску у web-браузері, знадобиться запуск із середовища розробки.

Обговорення результатів

У роботі був створений функціонуючий додаток, здатний обробляти інформацію з сайтів, які підтримуються, візуалізувати отриману інформацію у структурованому стилі, формувати опис джерела інформації у трьох стилях, відобразити наукову роботу всередині додатка.

Першим кроком стала розробка моделі даних для кожного з ресурсів, а також опис парсингу усередині програми.

Додаток вміє обробляти наукові статті з таких джерел:

- Репозитарій Національного технічного Університету "Харківський Політехнічний Інститут";
- Репозитарій Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського;
- Репозитарій Національного фармацевтичного університету;
- Сайт міжнародної видавничої компанії Springer Science;
- Сайт цифрової бібліотеки IEEE Xplore;
- Сайт наукової бібліотеки Science Direct.

Оптимізація роботи додатку реалізувалась шляхом використання архітектури Flutter BloC. Це дозволило структурувати код, відокремити інтерфейс від логіки і наочно описати роботу програми залежно від різних станів.

Висновки

Підсумком виконання роботи став функціонуючий кросплатформений додаток, що може отримувати та обробляти посилання на репозитарії та сайти цифрових бібліотек, отримувати з них інформацію та відображати її у додатку. У додатку також можна створювати опис джерела інформації у різних стилях та відкривати наукову роботу.

Всі ці функції роблять додаток актуальним для використання студентами та викладачами у створенні наукових, дипломних, дослідницьких робіт. А також для ознайомлення з останніми дослідженнями колег у великій кількості наукових областей.

Кросплатформений додаток дозволяє швидко і зручно отримати всю доступну інформацію про роботу, а також переглянути саму роботу на своєму девайсі без використання сторонніх програм.

Список літератури

1. Бродський Г. Ю., Метельов В. О. Розробка додатку для оформлення джерел інформації за різними стандартами. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2022*. 19-21 жовтня 2022 р. Харків : НТУ «ХПІ». 2022. С. 307.
2. Blanco J. Z., Lucrédio D. A Holistic Approach for Cross-Platform Software Development. *Journal of Systems and Software*. 2021. Vol. 179. P. 110985. doi: 10.1016/j.jss.2021.110985.
3. Dorfer Thomas, et al. Impact of Mobile Cross-Platform Development on CPU, Memory and Battery of Mobile Devices When Using Common Mobile App Features. *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 175. P. 189–96. doi: 10.1016/j.procs.2020.07.029.
4. El-Kassas Wafaa S., et al. Taxonomy of Cross-Platform Mobile Applications Development Approaches. *Ain Shams Engineering Journal*. 2017. Vol. 8. no. 2. P. 163–90. doi: 10.1016/j.asej.2015.08.004.
5. Rieger Christoph, and Tim A. Majchrzak. Towards the Definitive Evaluation Framework for Cross-Platform App Development Approaches. *Journal of Systems and Software*. 2019. Vol. 153. P. 175–99. doi: 10.1016/j.jss.2019.04.001.
6. Rahul Raj C. P. and Seshu Babu Tolety. A Study on Approaches to Build Cross-Platform Mobile Applications and Criteria to Select Appropriate Approach. *2012 Annual IEEE India Conference (INDICON)*. 2012. P. 625–29. doi: 10.1109/INDICON.2012.6420693.
7. Zhang Bin, et al. Research and Implementation of Cross-Platform Development of Mobile Widget. *2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks*. 2011. P. 146-50. doi: 10.1109/ICCSN.2011.6014238.
8. Latif Mounaim, et al. Review of Mobile Cross Platform and Research Orientations. *2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*. 2017. P. 1–4. doi: 10.1109/WITS.2017.7934674.
9. Boukhary Shady and Eduardo Colmenares. A Clean Approach to Flutter Development through the Flutter Clean Architecture Package. *2019 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*. 2019. P. 1115–20. doi: 10.1109/CSCI49370.2019.00211.
10. Praveen Anagha, et al. Conference Room Booking Application Using Flutter. *2020 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCS)*. 2020. P. 0348–50. doi: 10.1109/ICCS48568.2020.9182183.

- Cheon Yoonsik and Carlos Chavez. Converting Android Native Apps to Flutter Cross-Platform Apps. *2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*. 2021. P. 1898–904. doi: 10.1109/CSCI54926.2021.00355.
- Mamoun Ragda, et al. Design and Development of Mobile Healthcare Application Prototype Using Flutter. *2020 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEE)*. 2021. P. 1–6. doi: 10.1109/ICCCEE49695.2021.9429595.
- Tabarés Raúl. HTML5 and the Evolution of HTML; Tracing the Origins of Digital Platforms. *Technology in Society*. 2021. Vol. 65. P. 101529. doi: 10.1016/j.techsoc.2021.101529.
- Du Timon C. et al. Managing Knowledge on the Web – Extracting Ontology from HTML Web. *Decision Support Systems*. 2009. Vol. 47, no.4. P. 319-31. doi:10.1016/j.dss.2009.02.011
- Rahul Raj C. P. and Seshu Babu Tolety. A Study on Approaches to Build Cross-Platform Mobile Applications and Criteria to Select Appropriate Approach. *2012 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 2012, pp. 625–29, doi: 10.1109/INDICON.2012.6420693.
- Zhang Bin, et al. Research and Implementation of Cross-Platform Development of Mobile Widget. *2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks*, 2011, pp. 146-50, doi:10.1109/ICCSN.2011.6014238
- Latif Mounaim, et al. Review of Mobile Cross Platform and Research Orientations. *2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, 2017, pp. 1–4, doi: 10.1109/WITS.2017.7934674.
- Boukhary Shady and Eduardo Colmenares. A Clean Approach to Flutter Development through the Flutter Clean Architecture Package, *2019 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, 2019, pp. 1115–20, doi: 10.1109/CSCI49370.2019.00211.

References (transliterated)

- Brodskiy G. Yu. and Mietielov V. O. Rozrobka dodatku dlia oformlennia dzherel informatsii za riznymy standartamy. *Informatsiini tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnologii, osvita, zdorovia: tezy dopovidei XXX mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2022*, 19-21 zhovtnia 2022 r. Kharkiv. NTU «KhPI», 2022, p. 307.
- Blanco J. Z. and Lucrédio D. A Holistic Approach for Cross-Platform Software Development. *Journal of Systems and Software*, 2021, vol. 179, p. 110985, doi: 10.1016/j.jss.2021.110985.
- Dorfer Thomas et al. Impact of Mobile Cross-Platform Development on CPU, Memory and Battery of Mobile Devices When Using Common Mobile App Features. *Procedia Computer Science*, 2020, 175, pp.189-96, doi:10.1016/j.procs.2020.07.029
- El-Kassas Wafaa S., et al. Taxonomy of Cross-Platform Mobile Applications Development Approaches. *Ain Shams Engineering Journal*, 2017, 8, 2, pp. 163–90, doi: 10.1016/j.asej.2015.08.004.
- Rieger Christoph and Tim A. Majchrzak. Towards the Definitive Evaluation Framework for Cross-Platform App Development Approaches. *Journal of Systems and Software*, 2019, vol. 153, pp. 175–99, doi: 10.1016/j.jss.2019.04.001.
- Praveen Anagha, et al. Conference Room Booking Application Using Flutter. *2020 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCS)*. 2020, pp. 0348–50, doi: 10.1109/ICCS48568.2020.9182183.
- Cheon Yoonsik and Carlos Chavez. Converting Android Native Apps to Flutter Cross-Platform Apps. *2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, 2021, pp. 1898–904, doi: 10.1109/CSCI54926.2021.00355.
- Mamoun Ragda, et al. Design and Development of Mobile Healthcare Application Prototype Using Flutter. *2020 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEE)*, 2021, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICCCEE49695.2021.9429595.
- Tabarés Raúl. HTML5 and the Evolution of HTML; Tracing the Origins of Digital Platforms. *Technology in Society*, 2021, vol. 65, p. 101529, doi: 10.1016/j.techsoc.2021.101529.
- Du Timon C., et al. Managing Knowledge on the Web – Extracting Ontology from HTML Web. *Decision Support Systems*, 2009, vol.47,4,pp.319-31,doi:10.1016/j.dss.2009.02.011

Відомості про авторів (About authors)

Метельов Володимир Олександрович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2633-6296; e-mail: volodymyr.mietielov@khp.edu.ua.

Mietielov Volodymyr – Ph. D., Associate Professor of the Department of Computer Modelling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID:0000-0002-2633-6296; e-mail: volodymyr.mietielov@khp.edu.ua

Марусенко Олексій Миколайович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; Харків, Україна; ORCID:0000-0001-6911-2500; e-mail:Oleksii.Marusenko@khp.edu.ua

Marusenko Oleksii – Assistant of the Department of Computer Modelling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6911-2500; e-mail: Oleksii.Marusenko@khp.edu.ua.

Бродський Гліб Юрійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; e-mail: brodskiy.gleb@gmail.com.

Brodskiy Glib – Student of the Department of Computer Modelling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: brodskiy.gleb@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Метельов В. О., Марусенко О. М., Бродський Г. Ю. Розробка застосунку для аналізу та дослідження параметрів наукових текстових документів, здатного працювати з кількома операційними системами. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 41-45. doi:10.20998/2413-4295.2022.04.06.

Please cite this article as:

Mietielov V., Marusenko O., Brodskiy G. Development of an application for the analysis and research of the parameters of scientific text documents capable of working with several operating systems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4(14), pp. 41–45, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.06.

Надійшла (received) 01.12.2022

УДК 331.101.1

doi:10.20998/2413-4295.2022.04.07

БЕЗПЛОТНІ СИСТЕМИ: ПРОБЛЕМИ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРА**Г. В. МИГАЛЬ^{1*}, О. Ф. ПРОТАСЕНКО²**¹ кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», Харків, УКРАЇНА² кафедра готельного і ресторанного бізнесу, Харківський національний економічний університет ім. Семена Кузнеця, Харків, УКРАЇНА

*e-mail: g.mygal@khai.edu

АНОТАЦІЯ З появою безпілотних систем розвиток ергономіки увійшов у новий етап вивчення людино-машинної взаємодії та загострив проблеми безпеки. Змінилися вимоги до безпеки, стійкості до відмов і надійності як самих систем так і головної їх ланки – людини-оператора. Нові виклики – нові проблеми людини у цифрових системах. Цифровізація дозволила створити безпілотні системи, але й створила ергономічне протиріччя між намірами та отриманим результатом. Суть його в тому, що на відміну від очікуваного підвищення ефективності та безпеки, зростання автоматизації в безпілотних системах призводить до збільшення ризиків, пов'язаних з людським впливом. Безпілотні авіаційні системи мають унікальні ергономічні проблеми, пов'язані з особливостями діяльності оператора безпілотних літальних апаратів та технічними особливостями самих безпілотних літальних апаратів як складних систем. У зв'язку з цим актуальним є аналіз причин проявів феномену людського фактору, що продовжуються, у функціонуванні безпілотних систем, а також пошук шляхів їх зниження. Мета роботи – аналіз проблеми людського фактору у складних системах, які активно використовують інформаційно-комунікаційні технології, на прикладі безпілотних авіаційних систем. У статті наводиться критичний погляд на проблеми людського фактору у безпілотній авіації, які не вирішуються у рамках наявних підходів. Запропоновано модель айсберга керування змінами у сфері безпеки складних систем. Показано, що людський фактор у безпілотних системах виникає та тяжко знижується у наслідок нетрансдисциплінарності освіти сучасних інженерів та операторів. І головну роль в подоланні цієї проблеми є знання, спрямовані на розуміння можливостей і обмежень людини як головної ланки системи, що потім приймає рішення у процесі управління. Показано, що треба приділяти значну увагу розвитку саме ергономічного мислення у кожного, чия діяльність стосується життєвого циклу складної системи – розробників та тих, хто обслуговує, операторів, менеджерів, викладачів. Тобто саме трансдисциплінарність освіти спеціалістів – від розробників до операторів цифрових систем дозволяє знизити вказані ризики людино-машинної взаємодії.

Ключові слова: безпілотні системи; безпілотні літальні апарати; людський фактор; діяльність; людина-оператор; автоматизація; навчання

UNMANNED SYSTEMS: HUMAN FACTOR PROBLEMS**G. MYGAL¹, O. PROTASENKO²**¹ Department of Automobile and Transportation Infrastructure, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, UKRAINE² Department of hotel and restaurant business, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT With the creation of unmanned systems the development of ergonomics has entered a new stage in studying human-machine interaction and exacerbated safety issues. The requirements for safety, resistance to failures and reliability of the systems and their main connection – the human operator, were changed. New challenges – new human problems in digital systems. Digitization has made it possible to create unmanned systems, but it has also created an ergonomic contradiction between intentions and results. Its essence is that, in contrast to the expected increase in efficiency and safety, the increase in unmanned systems automation leads to an increase in the risks associated with human influence. Unmanned aerial systems have unique ergonomic challenges related to the specifics of the UAV operator and the technical features of the UAVs themselves as complex systems. In this regard, it is relevant to analyze the reasons for the continuing manifestations of the human factor phenomenon in the functioning of unmanned systems and the search for ways to reduce them. The purpose is to study the human factor problem in complex systems that use information and communication technologies, using the example of unmanned aircraft systems. The article takes a critical look at the human factor issues in unmanned aviation that are not being addressed by existing approaches. An iceberg model of change management in the safety of complex systems is proposed. It is shown that the human factor in unmanned systems arises and severely decreases because of the nontransdisciplinary nature of the education of modern engineers and operators. And the essential role in overcoming this problem is knowledge aimed at understanding the capabilities and limitations of a person as the main link of the system, which then makes decisions in the management process. It is shown that it is necessary to pay considerable attention to the development of ergonomic thinking among everyone whose activities relate to the life cycle of a complex system. That is, it is the transdisciplinarity of the education of specialists that allows for reducing the specified risks of human-machine interaction.

Keywords: unmanned systems; unmanned aerial vehicles; human factor; activity; human operator; automation; training

Вступ

Проблема безпеки складних динамічних систем (СДС) у непередбачуваних умовах є

міждисциплінарною і актуальною. Застосування кіберфізичних систем (Індустрія 4.0) викликало необхідність приділити особливу увагу людино-машинній взаємодії. Перехід до Індустрії 5.0

безпосередньо показав взаємозв'язок надійності кіберфізичних систем із людино-машинною комунікацією. Поява коботів та ускладнення сприйняття людиною нових роботизованих систем викликала увагу та інтерес до когнітивних можливостей людини [1,2]. Це у свою чергу викликало стрімкий розвиток наук, спрямованих на вирішення проблем людино-машинної взаємодії – ергономіки, інженерії людського чинника, інженерної психології, біоінженерії тощо.

Технологія майбутнього – безпілотні системи – вже сьогодні активно слугує людині. З появою безпілотних авіаційних систем (БАС) та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) розвиток ергономіки увійшов у новий етап вивчення людино-машинної взаємодії у складних системах. Змінилися вимоги до безпеки, стійкості до відмов і надійності як самих систем так і головної їхньої ланки – людини-оператора. Нові технологічні виклики призвели до появи нових проблем, пов'язаних із діяльністю людини у цифрових системах. Цифровізація та зростання автоматизації дозволили суттєво просунутися у технологіях, але також і суттєво змінили вимоги до когнітивних здібностей і психофізіологічних можливостей сучасної людини.

З одного боку, цифровізація дозволила створити безпілотні системи, проте, з іншого боку, не дозволяє поки що вийти із замкнутого кола проблем «зростання автоматизації – прояв феномена людського фактора (ЛФ)». Наприклад, поява БАС і БПЛА означає новий тип діяльності, нове робоче місце і вимоги до людини-оператора, нові проблеми людського фактора, а отже, і необхідність вирішувати питання відбору, допуску та контролю операторів.

Це підтверджено статистикою: 67% аварій із БПЛА сталися через людський фактор. Здавалося б, це значно менше, ніж 80–90% аварій з пілотованими суднами через помилку екіпажу або диспетчера. Однак, наприклад, на сьогодні у світі зареєстровано близько 35 000 пасажирських літаків, без урахування авіації загального призначення. При цьому кількість БПЛА зростає швидкими темпами. Так, у 2010 році Федеральне управління цивільної авіації США передбачало, що до 2020 року використовуватимуть близько 15 000 дронів. У 2016 році припускали, що до 2020 року їх буде до 550 000. Однак, за оцінкою NY Times, у 2016 році в США було продано 2 800 000 цивільних БПЛА [3]. Очевидно, що кількість БПЛА просто неможна порівняти з кількістю пілотованих авіаційних суден, отже, на той факт, що з ними трапляються аварії через людський фактор, необхідно звернути увагу. Те, що відсоток аварій з вини людського чинника у безпілотних авіаційних системах не знизився особливо по відношенню до пілотованих систем, викликає сильне занепокоєння фахівців у галузі безпеки. Адже йдеться про масовий перехід до безпілотних систем у всіх сферах людської діяльності, тому так важливо зараз аналізувати сучасний стан та розробляти майбутні вимоги щодо

забезпечення безпеки і відмовостійкості процесів та систем у безпілотних системах, що інтенсивно використовують інформаційно-комунікаційні технології. У зв'язку з цим сьогодні актуальним є аналіз причин проявів феномену людського фактора у функціонуванні безпілотних систем, а також пошук шляхів їх зниження.

Мета роботи

Мета роботи – аналіз проблеми людського фактора у складних системах, що використовують інформаційно-комунікаційні технології, на прикладі безпілотних авіаційних систем.

Основна мотивація полягає у скороченні розриву між теоретичними концепціями, запропонованими для усунення проблем людського фактора при моделюванні і проектуванні складних систем, та практичним здійсненням діяльності людини у безпілотних системах, на прикладі БПЛА.

Виклад основного матеріалу

Безпілотні літальні апарати є одним із важливих технологічних досягнень сучасності. Термін «безпілотні літальні апарати» (БПЛА, Unmanned Aerial Vehicles, UAV) відноситься до компонента ширшого класу безпілотних авіаційних систем (БАС, Unmanned Aircraft System, UAS). БПЛА – це клас літальних апаратів, які можуть літати без присутності на борту пілотів [4,5]. Вони є складними функціональними системами, що включають БПЛА, пункт управління з кількома операторами, системи зв'язку та іншого додаткового обладнання, необхідного для обслуговування БПЛА.

Зростання інтересу до безпілотних літальних апаратів виправдано. Основні позитивні відмінності від керованих кораблів: знижені вимоги безпеки у повітрі; відсутність систем екологічного контролю, систем життєзабезпечення тощо; відносно невисока собівартість і низькі витрати на їх експлуатацію.

Слід зазначити, що спочатку БПЛА розробляли лише для військових місій. У міру вдосконалення технологій управління і зниження витрат їх використання розширилося до багатьох невійськових програм: спостереження і тактичне планування; моніторинг стану нафтопроводів та газопроводів, стану забруднення довкілля, охорона великих територій зі складним рельєфом у денний і нічний час, стану природних ресурсів тощо; управління натовпом, контроль ситуації (наприклад, під час концертів і спортивних заходів); доставка корисного навантаження, пожежогасіння, переміщення об'єктів у небезпечному середовищі, видалені місії невідкладної медичної допомоги та багато іншого.

Однак, незважаючи на очевидні та незаперечні переваги, аварії з БПЛА мають місце і навіть з тяжкими наслідками. Ще в 2001 р. вважалося, що аварійність БПЛА значно вища, ніж пілотованих

літаків [6,7]. При цьому за всі роки існування з технічним удосконаленням безпілотних авіаційних систем кількість механічних відмов зменшується, а кількість відмов через людський фактор залишається високою і конкурує з показниками для пілотованих повітряних суден [6-9].

Таким чином, технології змінюють суть людино-машинної взаємодії. Управління безпілотним літальним апаратом унікальне тим, що функціонально поєднує у собі кабіну пілота і стандартне офісне робоче місце. При цьому оператор БПЛА не є ні стандартним пілотом із надзвичайно високою "ціною помилки", ні офісним працівником із комп'ютерною оргтехнікою, "ціна помилки" якого відносна і залежить від складності завдань. Це призводить до помилок, когнітивних спотворень сприйняття інформації тощо.

Очевидною є суперечність: зростання автоматизації і збільшення кількості автономних безпілотних операцій підвищує важливість інших аспектів взаємодії людини і системи. Ергономічний феномен полягає в тому, що з дедалі більшим обмеженням людини в управлінні системою роль людино-машинної взаємодії тільки зростає, що

підтверджують статистичні дані по інцидентах з БПЛА. Саме в цьому зв'язку знову стала актуальною і набула розвитку теорія життєздатності Богданова та Ешбі. Активно розвиваються інженерія людського фактору і ризик-орієнтований підхід, когнітивні науки та технології.

Відомо, що в галузі авіації посібники з людського чинника та інструкції з безпеки розробляли і вдосконалювали протягом десятиліть на підставі аналізу авіаційних інцидентів. Тобто «ціна» цих знань є надзвичайно високою. По відношенню до БПЛА, такий підхід заздалегідь приречений на провал, оскільки кількість БПЛА, що перебувають у експлуатації, не можна порівняти з пілотованими апаратами. Отже, над нами постійно знаходиться значна кількість потенційно небезпечних об'єктів, керованих людьми. І тут виявляються всі типові проблеми людського фактору: випадкові і навмисні помилки, недостатній рівень знань, відсутність певних навичок; помилки організаційного характеру, наслідки стресу або хвороби людини тощо. Очевидно, що необхідно прогнозувати управління ризиками, а не аналіз подій для напрацювання досвіду експлуатації (рис.1).



Рис. 1 – Модель «Айсберг» керування змінами у сфері безпеки складних систем

Тому сьогодні спостерігаємо ергономічну суперечність, яка полягає у такому: незважаючи на значні напрацювання авіаційної ергономіки та інженерної психології, наявні підходи щодо забезпечення безпеки літальних апаратів; розвинену методологічну базу інженерії людського фактору; стрімкий розвиток цифрових екосистем та високий рівень цифрової компетентності людей, з появою та стрімким розвитком БАС з'явилися нові виклики, пов'язані з діяльністю людини в них.

На наш погляд, на сьогодні, як і раніше, актуальними та невирішеними аспектами ергономічного забезпечення роботи авіаційних комплексів, тепер уже безпілотних, що потребують урахування особливостей людського фактору, є:

людино-машинний інтерфейс (неякісний інтерфейс у БАС, що відзначають багато дослідників); щодо операторів БПЛА: навчання майбутніх операторів та відбір до професії; відбір надійних операторів для керування БПЛА; забезпечення надійності діяльності оператора БПЛА; визначення поточного функціонального стану операторів БПЛА.

За час існування повітряних суден роль людини в них зазнала істотних змін у зв'язку зі зростанням автоматизації процесів управління. Спочатку роль пілота полягала в ручному управлінні, поступово вона перейшла до диспетчерського управління і операторського стеження, далі - до функціонування у «безпілотних» літаках. Тобто безпосередньо діяльність людини з керування літаком

еволюціонувала від використання приладів у кабіні та ручного управління до здійснення моніторингу приладів у кабіні, які керують літаком майже автоматично, до використання інструментів наземної станції для віддаленого керування літаком [4].

Безпілотна авіація показує унікальний набір проявів людського фактору [4–9]. Наприклад, пілот повітряного судна фізично сприймає й обробляє інформацію в кабіні. При цьому оператор БПЛА подумки сприймає та обробляє інформацію віддалено від об'єкта управління. Діяльність оператора БПЛА переважно є когнітивною. Він повинен мати значну швидкість реакції і розумових процесів, високий ступінь уваги. Високі темпи виконання завдань експлуатації БПЛА та значна тривалість місій викликає підвищене стресове навантаження і перевтому. Перевантаження через багатозадачність під час завдань управління БПЛА може поставити під загрозу виконання завдання і збільшити ймовірність невдачі або провалу місії [6,9]. Це погіршує стабільність і надійність діяльності операторів і призводить до відтоку кадрів. Найчастіше проблемами діяльності оператора БПЛА дослідники називають [4–9]: відмову від моніторингу, зниження пильності, надмірну залежність від стандартних значень, самозаспокоєність, проблеми отримання й обробки інформації (збільшення затримки при виявленні проблем, недоотримання інформації, спотворення інформації при отриманні та аналізі) [5].

Унікальними ергономічними проблемами операторів БПЛА є [13,14]:

1) зниження сенсорних сигналів (спотворення зорового контакту з об'єктами (камера охоплює обмежене поле зору, зниження слухових, пропріоцептивних та нюхових відчуттів));

2) психологічне й емоційне сприйняття станції управління (вони більше нагадують диспетчерські чи офісні робочі станції, ніж традиційна кабіна);

3) нереальні, з погляду фізіології людини, терміни виконання місії (наприклад, понад 24 години) супроводжується ризиками, пов'язаними зі стомленням і далі необхідністю передачі управління іншому оператору, що підвищує ризики помилок;

4) можливість аварійного припинення польоту та знищення БПЛА призводить до появи таких проблем, як переоцінка ситуації і своєї ролі в ній, навмисні дії, ризики наземних об'єктів тощо;

5) довіра до автоматизації. На відміну від літака, у БПЛА повністю відсутнє ручне управління.

Постійне вдосконалення та автоматизація СДС супроводжується збільшенням кількості джерел інформації (сенсорів, датчиків тощо), що породжує ще більшу різноманітність:

1) інформаційних потоків різної природи;

2) способів їхньої обробки;

3) типів візуалізації і засобів моделювання й аналізу.

Тому, незважаючи на значні зусилля розробників складних систем, ніде феномен

автоматизації не проявляється більшою мірою, ніж у безпілотних авіаційних системах та управлінні БПЛА. Підвищення автоматизації пов'язане зі збільшенням розумового навантаження, втратою усвідомлення ситуації і навіть погіршенням навичок. Автоматизація викликає довіру та прийняття оператора, а також самозаспокоєність. Саме самозаспокоєність через автоматизацію відзначено Parasuraman та ін. як фактор, що сприяє багатьом авіаційним подіям, що знижує надійність системи [10-15]. При цьому підвищення рівня автоматизації не призводить до зниження робочого навантаження або підвищення продуктивності БАС.

Крім того, виникають нові проблеми людино-машинної взаємодії. Так, якщо четверта промислова революція – це впровадження в життя людини й індивідуальна оптимізація через застосування інформаційно-комунікаційних технологій, то п'ята – це оптимізація суспільства через інтеграцію кіберпростору і фізичного простору [13-15]. У той час, як головна проблема Індустрії 4.0 – це автоматизація, Індустрія 5.0 передбачає синергію між людьми та автономними машинами. І людині доведеться працювати разом із роботами та виконувати діяльність нарівні з ними. Коботи помічатимуть, розумітимуть і відчуватимуть не тільки людину, але також цілі й очікування людини-оператора. Наприклад, створена інтуїтивно зрозуміла система наскрізної взаємодії між людиною та безпілотним літальним апаратом (An Intuitive End-to-End Human-UAV Interaction System), в якій природними позами людини можна здійснювати керування БПЛА. Тобто п'ята промислова революція – це злиття фізичного світу та трьох її основних елементів – інтелектуальних пристроїв, систем і автоматизації. Однак у центрі всіх взаємозв'язків буде людський інтелект, когнітивні здібності людини та психофізіологічні можливості, як показано у роботах [15-19].

Обговорення результатів

Безпека технологій і обладнання, безпека діяльності людини в цьому середовищі – ознака найвищої кваліфікації людини. Уміння запобігти ризикам і мінімізувати можливі негативні наслідки, пов'язані із людським фактором, це сьогодні одна з найсуттєвіших професійних навичок. Очевидно, сьогодні між освітньою галуззю і потребами суспільства сформувалося протиріччя: необхідність забезпечувати безпеку складних систем (на транспорті, в енергетиці тощо) намагаються вирішити без первинної ланки – навчання спеціалістів, що будуть забезпечувати безпеку.

Тобто саме помилки при проектуванні безпілотних систем, не врахування психофізіологічної і когнітивної специфіки людини-оператора при розробці інтерфейсу та їх технічних якостей та можливостей, є підґрунтям для створення проблеми

безпеки у БПЛА. Тому сьогодні при проектуванні і експлуатації складних систем, до яких належить БПЛА, необхідно враховувати індивідуальні

можливості й обмеження людини як головної ланки системи, що потім приймає рішення у процесі управління [17-19] (рис. 2).

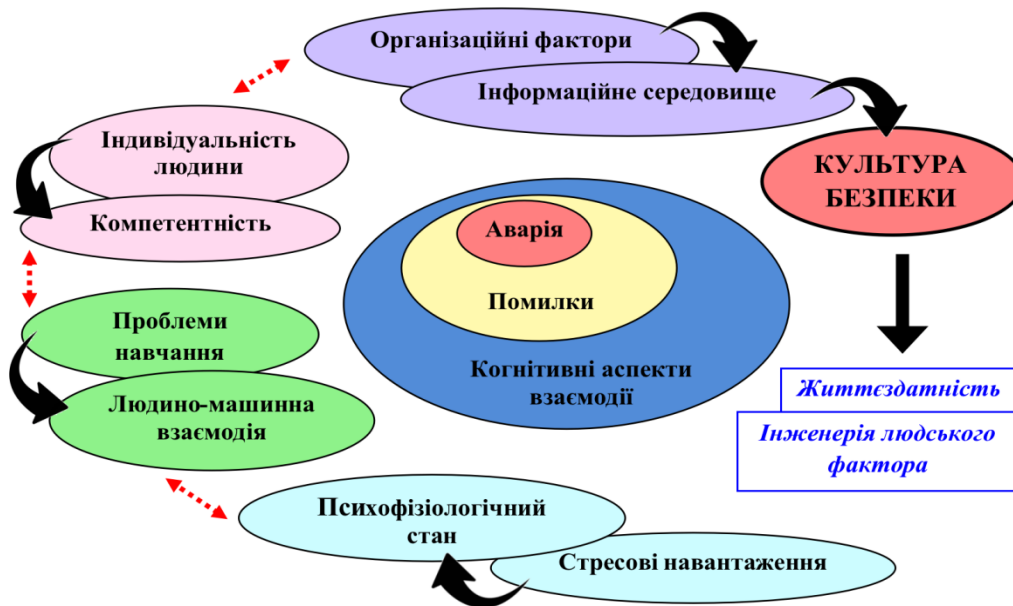


Рис. 2 – Міждисциплінарність у навчанні фахівців – з урахуванням сучасних викликів

Конвергентне об'єднання інженерних наук, інформаційних технологій, психології, біоінженерії, нейро- і когнітивних наук дозволяють створити умови для забезпечення безпеки, надійності і стійкості складних людино-машинних систем, що проектуються та експлуатуються [20-25].

Треба приділяти значну увагу розвитку саме ергономічного мислення у кожного, чия діяльність стосується життєвого циклу складної системи – розробників та тих хто обслуговує, операторів та менеджерів. Тому що це система поглядів індивіда на розвиток складних людино-машинних систем і ролі людини в них; це розуміння складних процесів людино-машинної взаємодії; вміння прогнозувати ризики в цих системах і планувати розробку систем з попереднім урахуванням цих ризиків. Зрештою ергономічне мислення для фахівця сьогодення, а тим більше майбутнього, наряду з екологічним і критичним мисленням є ознакою освіченості, є фундаментом високої кваліфікації спеціаліста [24,25].

Проблема підготовки операторів БПЛА має кілька аспектів, оскільки уже сьогодні використання дронів на робочому місці викликає ряд загроз. Поява розумних інтерфейсів, які здатні до самонавчання, виявило проблему розуміння людської природи. Можливість управляти безпілотними системами стала доступною широкому колу спеціалістів, що не мають ключових знань для забезпечення надійного управління БПЛА – про сприйняття й обробку інформації людиною, помилки оператора, психологію поведінки в екстремальних ситуаціях та ергономічні властивості систем. Більшість дисциплін когнітивного

й ергономічного напрямків у провідних вузах світу покликані дати майбутнім спеціалістам знання в області людино-машинної взаємодії. Необхідно лише усвідомлення, що без таких знань неможлива якісна технічна розробка. Саме трансдисциплінарність освіти спеціалістів – від розробників до виконавців і операторів цифрових систем дозволяє знизити вказані ризики людино-машинної взаємодії [20-25].

Висновки

Необхідно визнати, що з появою і стрімким розвитком безпілотних авіаційних систем з'явилися нові виклики, пов'язані з діяльністю людини у них. У безпілотних системах проблема людського чинника є досить гострою. Безпілотні авіаційні системи мають унікальні ергономічні проблеми, пов'язані з особливостями діяльності оператора БПЛА і технічними особливостями самих БПЛА як складних систем. Сьогодні загострилися важливі аспекти ергономічного забезпечення роботи безпілотних авіаційних комплексів, які потребують урахування особливостей людського фактору під час проектування, експлуатації та навчання операторів.

Нагальною потребою є також впровадження ергономіки як обов'язкової дисципліни для інженерів-проектувальників складних систем. Саме розвитку ергономічного мислення у майбутніх інженерів треба приділяти значну увагу, тому що це система поглядів індивіда на розвиток складних людино-машинних систем і ролі людини в них; це розуміння складних процесів людино-машинної взаємодії; вміння

прогнозувати ризики в цих системах і планувати розробку систем з попереднім урахуванням цих ризиків. Зрештою ергономічне мислення для інженера сьогодні, а тим більше майбутнього, наряду з екологічним і критичним мисленням є ознакою освіченості і підґрунтям високої кваліфікації спеціаліста.

Список літератури

1. Nahavandi S. Industry 5.0 – A Human-Centric Solution. *Sustainability*. 2019. № 1 (16). № 4371. doi: 10.3390/su11164371.
2. Reiman A., Kaivo-oja J., Parviainen E., Takala Esa-Pekka, Lauraeus Th. Human factors and ergonomics in manufacturing in the industry 4.0 context – A scoping review. *Technology in Society*. 2021. № 65. Article id: 101572. doi: 10.1016/j.techsoc.2021.101572.
3. Wingfield N. A Field Guide to Civilian Drones. *NY Times*. August, 2016. URL: https://web.archive.org/web/20161119145203/http://www.nytimes.com/interactive/2015/technology/guide-to-civilian-drones.html?_r=0
4. Duffy V. G., Landry S. J., Lee J. D., Stanton N. *Human-Automation Interaction: Transportation*. Springer Nature, 2022. 673 p.
5. Chiou E. K., Lee J. D. Trusting Automation: Designing for Responsivity and Resilience. *Human Factors*. 2021. doi: 10.1177/00187208211009995.
6. Lee J. D. Perspectives on Automotive Automation and Autonomy. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*. 2018. 12 (1). P. 53–57. doi: 10.1177/15553434177264.
7. Filippo De Florio. *Airworthiness of Unmanned Aircraft Systems (UAS)*. Airworthiness (Third Edition), 2016. doi: 10.1016/B978-0-08-100888-1.00011-2.
8. Jean-Louis Roch. UAV Classification and Associated Mission Planning. In *Multi-Rotor Platform-based UAV Systems*. 2020. P. 27-44. doi: 10.1016/C2017-0-00161-1.
9. Cook S. P., Brooks D., Cole R., Hackenberg D., Raska V. *Defining well-clear for unmanned aircraft systems*. AIAA Infotech@Aerospace. 2015. P. 0481. doi: 10.2514/6.2015-0481.
10. Sony M., Naik S. Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: a literature review. *Benchmarking: An International Journal*. 2020. 27(7). P. 2213–2232. doi: 10.1108/BIJ-09-2018-0284.
11. Zheng T., Ardolino M., Bacchetti A., Perona M. The applications of Industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*. 2020. 59(6). P. 1922–1954. doi: 10.1080/00207543.2020.1824085.
12. Colli M., Berger U., Bockholt M. T. A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era. *Annual Reviews in Control*. 2019. 48. P. 165–177. doi: 10.1016/j.arcontrol.2019.06.001.
13. Lee J. D., Wickens C. D., Liu Y., Boyle L. N. *Designing for People: An introduction to human factors engineering*. Charleston, SC: CreateSpace, 2017. 692 p.
14. Hancock P. A., Lee J. D., Senders J. W. Attribution errors by people and intelligent machines. *Human factors*. 2021. doi: 10.1177/001872082110363.
15. Stephen J. Guastello. *Human Factors Engineering and Ergonomics: A Systems Approach*. 2nd Edition, 2022.

16. Ciccarelli M. A system to improve the physical ergonomics in Human-Robot Collaboration. *Procedia Computer Science*. 2022. 200. P. 689–698. doi: 10.1016/j.procs.2022.01.267
17. Protasenko O., Mygal G. Human Factors: The Problem of Man-machine Interaction in the Digitalization Conditions. *Scientific Journal of Polonia University*. 2021. № 48. № 5. P. 198–210. doi: 10.23856/4825.
18. Mygal G., Mygal V., Protasenko O., Klymenko I. Cognitive Aspects of Ensuring the Safety, Dependability and Stability of a Dynamic System's Functioning in Extreme Conditions. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021. Vol. 367. doi: 10.1007/978-3-030-94259-5_18.
19. Mygal G., Protasenko O. Human resources are a factor in applying of man-machine systems safety. *Municipal Economy of Cities*. 2020. № 6(159). P. 139–146. doi: 10.33042/2522-1809-2020-6-159-139-146.
20. Rigolot C. Transdisciplinarity as a discipline and a way of being: complementarities and creative tensions. *Humanities and Social Sciences Communications*. 2020. Vol. 7 (1). 100. doi: 10.1057/s41599-020-00598-5.
21. Bernstein J. H. Transdisciplinarity: A Review of Its Origins, Development, and Current Issues. *Journal of Research Practice*. 2015. 11(1). Article R1.
22. Hannon D., Rantanen E., Sawyer B., Hughes A., Darveau K., O'Donnell R. The education of the human factors engineer in the age of data science. *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*. 2020. № 64 (1). P. 480-484. doi: 10.1177/1071181320641109.
23. Marvel J. A., Bagchi S., Zimmerman M., Antonishek B. Towards Effective Interface Designs for Collaborative HRI in Manufacturing: Metrics and Measures. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*. 2020. 9(4). P. 1–55. doi: 10.1145/3385009.
24. Mygal V., Mygal G., Mygal S. Transdisciplinary convergent approach - human factor. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2021. № 4(100). P. 7-21. doi: 10.32620/reks.2021.4.01.
25. Mygal V., Mygal G., Mygal S. Cognitive Space for Online and Offline Learning: A Convergent Approach. *The Educational Review, USA*. 2022. № 6(4). P. 109–123. doi: 10.26855/er.2022.04.001.

References (transliterated)

1. Nahavandi S. Industry 5.0 – A Human-Centric Solution. *Sustainability*, 2019, no. 1 (16), no 4371, doi: 10.3390/su11164371.
2. Reiman A., Kaivo-oja J., Parviainen E., Takala Esa-Pekka, Lauraeus Th. Human factors and ergonomics in manufacturing in the industry 4.0 context – A scoping review. *Technology in Society*, 2021, no. 65, article id: 101572, doi: 10.1016/j.techsoc.2021.101572.
3. Wingfield N. A Field Guide to Civilian Drones. *NY Times*. August, 2016. Available at: https://web.archive.org/web/20161119145203/http://www.nytimes.com/interactive/2015/technology/guide-to-civilian-drones.html?_r=0.
4. Duffy V. G., Landry S. J., Lee J. D., Stanton N. *Human-Automation Interaction: Transportation*. Springer Nature, 2022. 673 p.
5. Chiou E. K., Lee J. D. Trusting Automation: Designing for Responsivity and Resilience. *Human Factors*, 2021, doi: 10.1177/00187208211009995.

6. Lee J. D. Perspectives on Automotive Automation and Autonomy. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2018, 12 (1), pp. 53–57, doi: 10.1177/15553434177264.
7. Filippo De Florio. *Airworthiness of Unmanned Aircraft Systems (UAS)*. Airworthiness (Third Edition), 2016, doi: 10.1016/B978-0-08-100888-1.00011-2.
8. Jean-Louis Roch. UAV Classification and Associated Mission Planning. In *Multi-Rotor Platform-based UAV Systems*. 2020, pp. 27-44, doi: 10.1016/C2017-0-00161-1.
9. Cook S. P., Brooks D., Cole R., Hackenberg D., Raska V. Defining well-clear for unmanned aircraft systems. *AIAA Infotech@Aerospace*, 2015, p. 0481, doi: 10.2514/6.2015-0481.
10. Sony M., Naik S. Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: a literature review. *Benchmarking: An International Journal*, 2020, 27(7), pp. 2213–2232, doi: 10.1108/BIJ-09-2018-0284.
11. Zheng T., Ardolino M., Bacchetti A., Perona M. The applications of Industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 2020, 59(6), pp. 1922–1954, doi: 10.1080/00207543.2020.1824085.
12. Colli M., Berger U., Bockholt M. T. A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era. *Annual Reviews in Control*, 2019, 48, pp. 165–177, doi: 10.1016/j.arcontrol.2019.06.001.
13. Lee J. D., Wickens C. D., Liu Y., Boyle L. N. *Designing for People: An introduction to human factors engineering*. Charleston, SC. CreateSpace, 2017. 692 p.
14. Hancock P. A., Lee J. D., Senders J. W. Attribution errors by people and intelligent machines. *Human factors*, 2021. doi: 10.1177/001872082110363.
15. Stephen J. Guastello. *Human Factors Engineering and Ergonomics: A Systems Approach*. 2nd Edition, 2022.
16. Ciccarelli M. A system to improve the physical ergonomics in Human-Robot Collaboration. *Procedia Computer Science*, 2022, 200, pp. 689–698, doi: 10.1016/j.procs.2022.01.267.
17. Protasenko O., Mygal G. Human Factors: The Problem of Man-machine Interaction in the Digitalization Conditions. *Scientific Journal of Polonia University*, 2021, no. 48 (5), pp. 198–210, doi: 10.23856/4825.
18. Mygal G., Mygal V., Protasenko O., Klymenko I. Cognitive Aspects of Ensuring the Safety, Dependability and Stability of a Dynamic System's Functioning in Extreme Conditions. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, Vol. 367, doi: 10.1007/978-3-030-94259-5_18.
19. Mygal G., Protasenko O. Human resources are a factor in applying of man-machine systems safety. *Municipal Economy of Cities*, 2020, no. 159(6), pp. 139–146, doi: 10.33042/2522-1809-2020-6-159-139-146.
20. Rigolot C. Transdisciplinarity as a discipline and a way of being: complementarities and creative tensions. *Humanities and Social Sciences Communications*, 2020, Vol. 7 (1), 100, doi: 10.1057/s41599-020-00598-5.
21. Bernstein J. H. Transdisciplinarity: A Review of Its Origins, Development, and Current Issues. *Journal of Research Practice*, 2015, 11(1), Article R1.
22. Hannon D., Rantanen E., Sawyer B., Hughes A., Darveau K., O'Donnell R. The education of the human factors engineer in the age of data science. *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, 2020, no. 64 (1), pp. 480-484, doi: 10.1177/1071181320641109.
23. Marvel J. A., Bagchi S., Zimmerman M., Antonishek B. Towards Effective Interface Designs for Collaborative HRI in Manufacturing: Metrics and Measures. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*, 2020, no. 9(4), pp. 1–55, doi: 10.1145/3385009.
24. Mygal V., Mygal G., Mygal S. Transdisciplinary convergent approach – human factor. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2021, no. 4 (100), pp. 7-21, doi: 10.32620/reks.2021.4.01.
25. Mygal V., Mygal G., Mygal S. Cognitive Space for Online and Offline Learning: A Convergent Approach. *The Educational Review, USA*, 2022, no. 6 (4), pp. 109–123, doi: 10.26855/er.2022.04.001.

Відомості про авторів (About authors)

Мигаль Галина Валеріївна – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», професор кафедри автомобілів та транспортної інфраструктури; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-9862-9338; e-mail: g.mygal@khai.edu.

Galina Mygal – Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, The National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Professor, Department of Automobile and Transportation Infrastructure; Kharkiv, Ukraine; ORCID ID: 0000-0002-9862-9338; e-mail: g.mygal@khai.edu.

Протасенко Ольга Федорівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, доцент кафедри готельного і ресторанного бізнесу; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8203-5703; e-mail: olha.protasenko@hneu.net.

Olga Protasenko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Simon Kuznets Kharkov National University of Economics, Docent, Department of hotel and restaurant business; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8203-5703; e-mail: olha.protasenko@hneu.net.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Мигаль Г. В., Протасенко О. Ф. Безпілотні системи: проблеми людського фактора. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 46-52. doi:10.20998/2413-4295.2022.04.07.

Please cite this article as:

Mygal G., Protasenko O. Unmanned systems: human factor problems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4(14), pp. 46–52, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.07.

Надійшла (received) 28.11.2022

УДК 006.86

doi:10.20998/2413-4295.2022.04.08

ЗАСТОСУВАННЯ ФУНКЦІЇ ПОМИЛОК ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ОБ'ЄКТІВ КВАЛІМЕТРІЇ

Н. А. СОРОКОЛАТ*, Л. Ю. ФАТЄЄВА

кафедра автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, УІПА, Харків, УКРАЇНА
*e-mail: olena-cheraniak@ukr.net

АНОТАЦІЯ Проаналізовано існуючі функціональні залежності між вимірними значеннями показників якості та їх оцінкою на безрозмірній шкалі, які застосовували для оцінювання об'єктів кваліметрії різної природи. Показано, що для об'єктивного оцінювання об'єктів кваліметрії, як правило, потрібно застосовувати нелінійні залежності. Головне завдання дослідника полягає у виборі виду нелінійної залежності, це потребує додаткових наукових досліджень. Інструментом для вибору тої чи іншої нелінійної залежності є розуміння фізичної суті об'єкту кваліметрії, тобто розуміння закономірностей зв'язку між вимірними значеннями показників кваліметрії та їх оцінкою. Визначено, що при оцінюванні якості об'єктів кваліметрії необхідно мати оцінки різнорозмірних показників якості у безрозмірному вираженні. Для отримання безрозмірних оцінок необхідно знати вид залежності між дійсними показниками якості та їх оцінкою. Пошук такої залежності являється не простою науковою задачею та потребує ряду досліджень. Для отримання оцінок різнорозмірних показників якості у безрозмірну шкалу пропонується застосувати таку математичну залежність, яка би враховувала недоліки існуючих та була би методично та практично забезпечена. Адже будь яка наукова задача повинна бути доведена до практичного застосування. За математичну залежність пропонується застосувати функцію помилок, яка є неелементарною та застосовується у математичній статистиці та математичній фізиці для вирішення деяких практичних завдань. Використання функції помилок стало можливим завдяки розвитку комп'ютерної техніки, адже для її застосування потрібно ряд математичних перетворень. Функція помилок є стандартизованою у прикладних програмах, тому є великі можливості щодо її практичного застосування. Для кількісного оцінювання якості об'єктів різної природи пропонується застосовувати функцію помилок. Перевірено її спроможність та ефективність. Запропонована функція може бути універсальною. Перевірено, що її можна застосовувати для оцінювання якості об'єктів кваліметрії різної природи.

Ключові слова: оцінювання якості; кваліметричні методи; функція помилок; показник якості; об'єкти різної природи

APPLICATION OF THE ERROR FUNCTION FOR ASSESSING THE QUALITY OF QUALIMETRY OBJECTS

N. SOROCOLAT*, L. FATIEIEVA

Department of automation, metrology and energy-efficient technologies, UIPA, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The existing functional dependencies between the measured values of quality indicators and their evaluation on a dimensionless scale, which were used to evaluate qualimetry objects of different nature, are analyzed. It is shown that for an objective assessment of qualimetry objects, as a rule, it is necessary to apply nonlinear dependencies. The main task of the researcher is to choose the type of nonlinear dependence, it requires additional scientific research. A tool for choosing a particular nonlinear dependence is to understand the physical essence of the qualimetry object, that is, to understand the laws of the relationship between the measured value of qualimetry indicators and their evaluation. It is determined that when assessing the quality of qualimetry objects, it is necessary to have estimates of multidimensional quality indicators in dimensionless terms. To obtain dimensionless estimates, it is necessary to know the type of dependence between the actual quality indicators and their estimates. The search for such dependence is not a simple scientific task and requires a number of studies. To obtain estimates of different quality indicators in a dimensionless scale, it is proposed to apply such a mathematical dependence that would take into account the shortcomings of the existing ones and would be methodologically and practically provided. After all, any scientific problem must be brought to practical application. As a mathematical dependence, it is proposed to apply the error function, which is non-elementary and is used in mathematical statistics and mathematical physics to solve some practical problems. The use of the error function became possible due to the development of computer technology, because its application requires a number of mathematical transformations. The error function is standardized in applications, so there are great opportunities for its practical application. It is proposed to use the error function for quantitative assessment of the quality of objects of different nature. Its capability and efficiency are checked. The proposed function can be universal. It is checked that it can be used to assess the quality of qualimetry objects of different nature.

Keywords: quality assessment; qualitative methods; error function; quality indicator; objects of various nature

Вступ

Розвиток суспільства пов'язаний з розвитком технологій, що сприяє розвитку методологічних

підходів до їх оцінювання з метою ефективного управління. Будь-який процес управління потребує знання інформації про стан технологічного процесу у минулому, щоб прийняти управлінське рішення з

метою його покращення. Таку інформацію отримують у результаті моніторингу, збору та опрацювання існуючої статистичної інформації про показники якості технологічного процесу у минулому. Від кількості та достовірності наявної статистичної інформації залежить ефективність управлінських дій.

Для прийняття управлінських рішень, статистична інформація про якість технологічних процесів повинна бути оцінена у кількісному вираженні, а для її ефективного опрацювання інформація повинна бути у єдиній шкалі оцінювання. Методологія кількісного оцінювання якості регламентована предметом науки – кваліметрія. Кваліметрія – це предмет науки, який вивчає способи та методи кількісного оцінювання якості об'єктів різної природи не залежно від галузі промисловості. Так, наприклад [1], оцінюють якість автомобілів та упаковки, житлової квартири та зброї, продуктів харчування та електронної продукції, якості банківського обслуговування та здоров'я людини. Різноманітність об'єктів кваліметрії потребує універсального підходу, що дозволить автоматизувати процес оцінювання з метою подальших управлінських дій.

В основі кваліметрії лежать ряд принципів, що дозволяють правильно класифікувати та аналізувати методи кількісного оцінювання якості [2].

Принцип 1. Показник якості i -го рівня визначається відповідними показниками якості $(i + 1)$ -го рівня. Тобто, показники якості можуть мати декілька рівнів, що підтверджує необхідність єдиної методології оцінювання.

Принцип 2. Вимірювання окремих показників якості повинно виражатися відносно базового (найкращого, еталонного) показника.

Принцип 3. Оцінювання показників якості здійснюється з точки зору суспільної потреби, тобто повинно задовольняти усіх її споживачів.

Принцип 4. Різні шкали оцінювання абсолютних показників якості повинні бути трансформовані в одну безрозмірну шкалу.

Принцип 5. Кожен показник якості визначається відносним показником та його вагомістю.

Принцип 6. Сума вагомостей показників якості кожного рівня – постійна величина.

Принцип 7. Вагомість і оцінка показника якості i -го рівня визначається вимогами показника $(i - 1)$ -го рівня.

Набір вище перерахованих принципів являється фундаментальною основою кількісної оцінки якості об'єктів кваліметрії різної природи не залежно від сектору економіки.

З переліку фундаментальних принципів зрозуміло, що при оцінюванні якості об'єктів кваліметрії необхідно мати оцінки різнорозмірних показників якості у безрозмірному вираженні. Для отримання безрозмірних оцінок необхідно знати вигляд залежності між дійсними показниками якості

та їх оцінкою. Пошук такої залежності являється непростю науковою задачею та потребує ряду досліджень.

Мета роботи

Розглянути можливість та ефективність застосування функції помилок як функціональної залежності між дійсними показниками якості та їх оцінкою на безрозмірній шкалі.

Викладення основного матеріалу

Знаходження виду залежності між дійсним (вимірним) значенням показника якості будь якого об'єкту кваліметрії та його оцінкою на безрозмірній шкалі являється центральним завданням у кваліметрії. Існує ряд наукових досліджень, у яких обґрунтовується той чи інший вигляд залежності. Часто застосовують лінійну залежність:

$$K_{ij} = \frac{P_{ij}}{P_{ij}^{баз}} \quad (1)$$

де P_{ij} – вимірний показник якості; $P_{ij}^{баз}$ – базовий показник якості.

При такій залежності необхідно знати величину базового (еталонного) показника якості. Зрозуміло, що при змінюванні числового значення показника якості змінюється його оцінка за лінійним характером. У такому випадку часто застосовують вагові коефіцієнти з метою перетворення такої залежності у нелінійний вид. Складність являється у тому, що для отримання вагового коефіцієнту необхідно застосовувати експертні методи, що затрудняє методіку оцінювання.

Зустрічаються і нелінійні залежності, наприклад, для оцінювання відхилень вимірюваного показника якості від вимог нормативних документів, яка застосовувалась в машинобудуванні [3]:

$$Z = 100 \exp\left(1 - \frac{x + \Delta x}{G}\right)\% \quad (2)$$

де x – числове значення відхилення; Δx – похибка вимірювання x ; G – допустиме значення величини відхилення показника якості, що регламентується стандартом.

Часто у науковій літературі зустрічається нелінійна залежність, яку запропонував Харрінгтон [4]:

$$K_{ij} = e^{-\left(P_{ij}\right)^{m_j}} \quad (3)$$

де m_j – позитивне число в межах $0 < m_j < \infty$; P_{ij}^0 – лінійна функція від P_{ij} .

Автори [5-7] у своїх роботах для оцінювання якості швейних виробів, а саме форменого одягу, застосовували залежність:

$$_1(x) = \exp(-\exp(-x)) \quad (4)$$

Такий вигляд залежності характерний не лінійністю, має експоненційний вид, та має переваги та недоліки. Перевагою являється те, що отримана оцінка ніколи не буде дорівнювати одиниці, але може дорівнювати нулю. Це закладено в математичну сутність залежності.

Це відповідає філософії вчення про якість, адже об'єкт може бути не годним, а до ідеального значення повинен наближатися. Недоліком являється той факт, що такий вид залежності – це кусочно монотонна функція, яка має точки злому, тому потребує розробки складної методики.

Так як залежність (4) володіє принципом симетрії, то були отримані ще такі залежності:

$$_2(x) = 1 - \exp(-\exp(x)) \quad (5)$$

$$_3(x) = \frac{\exp(-\exp(-x)) + (1 - \exp(-\exp(x)))}{2} \quad (6)$$

$$_4(x) = \frac{\exp(-\exp(-x)) + (1 - \exp(-\exp(x)))}{4} \quad (7)$$

$$_5(x) = \frac{\exp(-\exp(-x)) + 3(1 - \exp(-\exp(x)))}{4} \quad (8)$$

Важливим являється той факт, що у публікаціях [5-7] розроблено покрокові методики застосування функцій (4) – (8) та надані рекомендації щодо їх застосування. Автори показують, що ці залежності та розроблена методика можуть розглядатися як універсальні для оцінювання об'єктів різної природи.

У роботах [8-12] для отримання оцінок показників якості на безрозмірній шкалі застосовувався ще один вид залежності:

$$S_q = \begin{cases} 0 & q_i \leq q_{i\min} \\ \left[\frac{q_i - q_{i\min}}{q_{i\max} - q_{i\min}} \right]^\gamma & q_{i\min} < q_i < q_{i\max} \\ 1 & q_i \geq q_{i\max} \end{cases} \quad (9)$$

де $q_{i\min}$ – мінімальне значення показника якості; $q_{i\max}$ – максимальне значення показника якості; q_i – дійсне (вимірне) значення показника якості; γ – параметр форми.

Переваги залежності (9) у простоті застосування в виробничих умовах, адже допускові значення відомі з технічних умов чи з інших нормативних документів. Недоліком являється те, що складно визначити параметр форми, так як не існує єдиної методики, тому для різних об'єктів кваліметрії необхідно застосовувати експертні методи. Це призводить до затрат часу та ресурсів. Існує також відомий метод отримання безрозмірних оцінок

показників якості SAW [13] (просте адитивне зважування), суть якого у тому, що для кожного вимірюваного показника якості додають ваговий коефіцієнт. Такий коефіцієнт надають експерти, які добре розуміються на фізичній суті оцінки.

Досить відомий та часто застосовуваний метод багатокритеріального оцінювання TOPSIS – це метод, який враховує еталонне (найкраще) значення показника якості [14,15]. Його застосовують при комплексному оцінюванні якості об'єктів кваліметрії [16,17].

У різних галузях економіки, особливо це відноситься до соціальних сфер, застосовують ряд існуючих методів комплексного оцінювання процесів, систем та різних видів діяльності, серед яких метод: PROMETHEE; WASPAS; MOORA [18-20].

Для отримання оцінок різномірних показників якості у безрозмірну шкалу пропонується застосувати таку математичну залежність, яка б враховувала недоліки існуючих та була би методично та практично забезпечена. Адже будь-яка наукова задача повинна бути доведена до практичного застосування.

Як математичну залежність пропонується застосувати функцію помилок, що є неелементарною та застосовується у математичній статистиці та математичній фізиці для вирішення деяких практичних завдань. Застосування функції помилок стало можливим завдяки розвитку комп'ютерної техніки, адже для її застосування потрібно ряд математичних перетворень. Функція помилок є стандартизованою у прикладних програмах, тому є великі можливості щодо її практичного застосування [21]. Функція помилок має вигляд:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (10)$$

На рис. 1 представлено графічний вид функції (10).

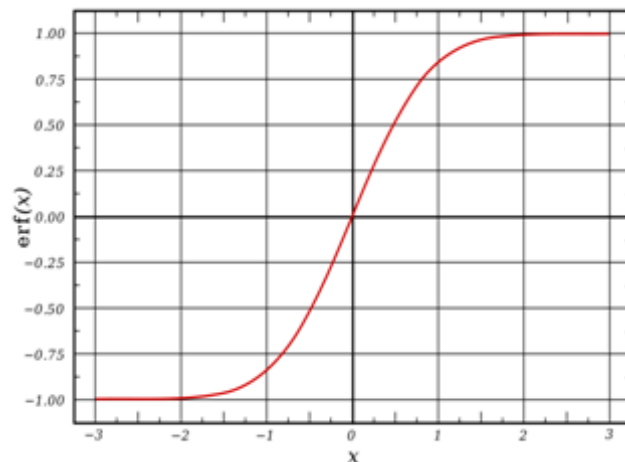


Рис. 1 – Графічний вид функції помилок (10)

Як відомо, оцінки показників якості мають бути у єдиній шкалі оцінювання. Цей факт робить процес оцінювання більш ефективним, так як дозволяє збільшувати обсяг статистичної інформації для прийняття управлінських рішень.

З рис. 1 видно, що швидкість зміни залежності не рівномірна з ліва на право, а саме, по краях діапазону оцінювання графік залежності - пологий, зате в середині – стрімко зростає. Цей факт відповідає філософії оцінювання якості, адже зрозуміло, що виміряні показники та їхня оцінка залежні не лінійно. Тому можна зробити висновок, що математична залежність (10) обґрунтована та може вважатися універсальною для отримання оцінок якості об'єктів різної природи.

Так як нам потрібно отримати оцінки у діапазоні оцінювання: $0 \leq y(x) < 1$, то залежність (10) представимо у такому вигляді:

$$y(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(-2 + 4 \frac{x-a}{b-a} \right), \quad (11)$$

де $\operatorname{erf}(x)$ – функція помилок, a – найменше можливе допустиме значення показника якості об'єкту кваліметрії, b – найбільше можливе допустиме значення об'єкту кваліметрії; x – дійсне значення показника якості. Зауважимо, що функція $y(x)$ в точці a приймає значення близьке до нуля, а в точці b – близьке до одиниці. Графічний вид залежності (11) представлено на рис. 2.

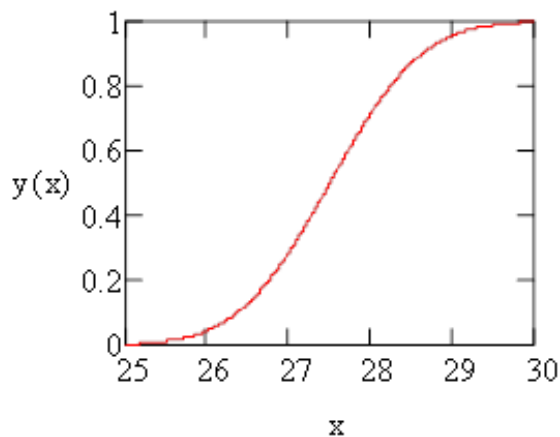


Рис. 2 – Вид залежності (11)

Залежність (11) характерна тим, що у результаті отримується оцінка показника якості від нуля до одиниці, а вісь (x) обмежена гранично допустимими значеннями показника якості об'єкту кваліметрії, які визначені нормативними документами. Існують випадки, коли оцінка обернена, тобто найбільшому значенню виміряного (дійсного) показника якості відповідає найменше значення оцінки на безрозмірній шкалі. У такому випадку можна застосовувати залежністю типу:

$$y'(x) = 1 - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(-2 + 4 \frac{x-a}{b-a} \right) \right) \quad (12)$$

Запропоновані залежності (11) та (12) можна вважати спроможними та ефективними, так як мають ряд переваг над існуючими, що застосовуються у кваліметрії, а саме:

- нелінійність такого виду відповідає теорії кваліметрії та обґрунтовується тим, що оцінки показників якості об'єкту оцінювання у незначній мірі міняються по краях оцінювання. Тому для практичного застосування важливо знати зміни показників у середині їх допускового діапазону. Саме залежності такого виду отримали найбільше застосувань у кваліметрії, наприклад (4) – (8);

- на відміну від існуючих залежностей, які потребують складних обчислень та застосування експертних методів, запропоновані використовують функцію помилок, яка є вбудованою в Microsoft Excel (ФОШ). Тобто не потрібно створювати спеціальне програмне забезпечення, що дозволяє автоматизувати процес оцінювання і, тим самим, розширює сфери застосування саме об'єктів різної природи (процесів, продукції, знань у різних галузях економіки тощо).

Запропоновані математичні залежності можуть стати практичним інструментом для її застосування, а також можуть бути впроваджені в нормативні документи рівня організації чи підприємства для запровадження процедури оцінювання якості об'єктів різної природи.

Висновки

Для кількісного оцінювання якості об'єктів різної природи пропонується застосовувати функцію помилок. Доказано її спроможність та ефективність. Отримані математичні залежності між показниками якості об'єкту кваліметрії та їх оцінкою. Представлено переваги, що дозволяє їх застосовувати для оцінювання якості об'єктів кваліметрії різної природи.

Список літератури

1. Енциклопедія сучасної України URL: http://esu.com.ua/search_articles.php?id=11519 (дата звернення: 25.11.2022).
2. Азгальдов Г. Г., Райхман Э. П. *О кваліметрії*. Москва: Издательство стандартов, 1972. 172 с.
3. Томашевский А. Попытка количественной оценки критериев качества измерительных устройств. *Помару, automatyko, kontrolia*. 1966. № 12. С. 8–9.
4. Harrington E. C. Jr. The desirability Function. *Industrial Quality Control*. 1965. № 21. P. 494–498.
5. Авиллов В. А. *Математико-статистические методы технико-экономического анализа производства*. Москва: Экономика, 1967. 264 с.
6. Триц Р. М., Слитюк Е. А. Обобщённая точечная и интервальная оценки качества изготовления детали

- ДВС. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2006. № 1/2 (19). С. 63–67.
7. Тришч Р. М., Слитюк Е. А. Точечная и интервальная оценки качества изделий. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Збірник наукових праць. НТУ «ХПІ». 2006. № 27. С. 96–102.
8. Trishch R., Maletska O., Cherniak O., Semionova Ju., Jancis V. Analysis of the requirements of international and national standards for measurement methods and metrological equipment. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2020. № 1 (11). P. 156–162. doi: 10.30837/2522-9818.2020.12.075.
9. Cherniak O., Trishch R., Kim N., Ratajczak S. Quantitative assessment of working conditions in the workplace. *Engineering Management in Production and Services*. 2020. №12(2). P. 99–106. doi: 10.2478/emj-2020-0014.
10. Trishch R., Cherniak O., Kupriyanov O., Luniachek V., Tsykhanovska I. Methodology for multi-criteria assessment of working conditions as an object of qualimetry. *Engineering Management in Production and Services*. 2021. №13 (2). P. 107–114. doi: 10.2478/emj-2021-0016.
11. Ginevičius R., Trishch H., Petraškevičius V. Quantitative assessment of quality management systems' processes. *Economic Research-Ekonomiska Istraživanja*. 2015. № 28. 1, P. 1096–1110. doi: 10.1080/1331677X.2015.1087676.
12. Черняк О. М., Тришч Р. М., Денисенко А. М. Методика оцінювання шкідливих чинників, які впливають на здоров'я робітників машинобудівного підприємства. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2019. № 5 (1330). С. 70–76. doi: 10.20998/2413-4295.2019.05.09.
13. Ginevičius R., Podvezko V. A feasibility study of multicriteria methods application to quantitative evaluation of social phenomena. *Business: Theory and Practice*. 2008. №9. P. 81–87. doi: 10.3846/1648-0627.2008.9.81-87.
14. Ginevičius R., Podvezko A. The evaluation of financial stability and soundness of Lithuanian Banks. *Ekonomiska istraživanja: znanstveno stručni časopis*. 2013. № 26. P. 191–208.
15. Ginevičius R., Suhajda K., Šimkūnaitė J. Lithuanian experience of quantitative evaluation of socioeconomic system position by multicriteria methods. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2014. № 110. P. 952–960. doi: 10.1016/j.sbspro.2013.12.941.
16. Šimelytė A., Antanavičienė J. The effect of investment promotion on FDI flows: A case of the Baltic States. *Business: Theory and Practice*. 2013. № 14. P. 200–208. doi: 10.3846/btp.2013.21.
17. Beinoraitė Š., Drejeris R. Population entrepreneurship measurement model. *Business: Theory and Practice*. 2014. № 15. P. 199–209. doi: 10.3846/btp.2014.20.
18. Krivka A. Complex evaluation of the economic crisis impact on Lithuanian industries. *Journal of Business Economics and Management*. 2014. № 15. P. 299–315. doi: 10.3846/16111699.2013.867277.
19. Brauers W., Ginevičius R., Podvezko A. Development of a methodology of evaluation of financial stability of commercial banks. *Panoeconomicus*. 2014. № 61. P. 349–367. doi: 10.2298/PAN1403349B.
20. Hashemkhani Zolfanir S., Maknoon E., Zavadskas K. Multiple Nash equilibriums and evaluation of strategies. New application of MCDM methods. *Journal of Business Economics and Management*. 2015. № 16. P. 290–305. doi: 10.3846/16111699.2014.967715.
21. Сороколат Н. А., Фатеева Л. Ю. Оцінювання якості процесів системи управління безпекою праці, згідно вимог міжнародного стандарту ISO 45001:2018. *Машинобудування*. 2022. № 29. С. 89–96. doi: 10.32820/2079-1747-2022-29.

References (transliterated)

1. Encyclopedia of modern Ukraine. Available at: http://esu.com.ua/search_articles.php?id=11519 (accessed 25.11.2022).
2. Azgaldov G., Rajhman E. *O kvalimetrii* [About qualimetry]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1973, 172 p.
3. Tomashevskiy A. Popytka kolichestvennoy otsenki kriteriyev kachestva izmeritel'nykh ustroystv [Attempt to quantify the quality criteria of measuring devices]. *Pomary, avtomatyko, kontrolia*, 1966, Vol. 12, pp. 8–9.
4. Harrington E. C. Jr. The desirability Function. *Industrial Quality Control*, 1965, Vol. 21, pp. 494–498.
5. Avilov V. A. *Matematiko-statisticheskiye metody tekhniko-ekonomicheskogo analiza proizvodstva* [Mathematical and statistical methods of technical and economic analysis of production]. Moscow, Economics, 1967, 264 p.
6. Trishch R. M., Slityuk E. A. *Obobshchonnaya tochehnaya i interval'naya otsenki kachestva izgotovleniya detali DVS* [Generalized point and interval evaluation items ICE workmanship]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2006, Vol. 1/2 (19), pp. 63–67.
7. Trishch R. M., Slityuk E. A. *Tochehnaya i interval'naya otsenki kachestva izdeliy* [Spot and interval evaluation of product quality]. *Bulletin of the NTU "KhPI". Collection of scientific works*, 2006, Vol. 27, pp. 96–102.
8. Trishch R., Maletska O., Cherniak O., Semionova Ju., Jancis V. Analysis of the requirements of international and national standards for measurement methods and metrological equipment. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2020, Vol. 1 (11), pp. 156–162, doi: 10.30837/2522-9818.2020.12.075.
9. Cherniak O., Trishch R., Kim N., Ratajczak S. Quantitative assessment of working conditions in the workplace. *Engineering Management in Production and Services*, 2020, Vol. 12, no. 2, pp. 99–106, doi: 10.2478/emj-2020-0014.
10. Trishch R., Cherniak O., Kupriyanov O., Luniachek V., Tsykhanovska I. Methodology for multi-criteria assessment of working conditions as an object of qualimetry. *Engineering Management in Production and Services*, 2021, Vol. 13, no. 2, pp. 107–114, doi: 10.2478/emj-2021-0016.
11. Ginevičius R., Trishch H., Petraškevičius V. Quantitative assessment of quality management systems' processes. *Economic Research-Ekonomiska Istraživanja*, 2015, Vol. 28, no. 1, pp. 1096–1110, doi: 10.1080/1331677X.2015.1087676.
12. Cherniak O., Trishch R., Denysenko A. *Metodyka otsynuyannya shkidlyvykh chynnykiv, yaki vplyvayut' na zdorov'ya robitynkiv mashynobudivnoho pidpryemstv* [Methods of assessing the harmful factors affecting the health of workers of a machine-building enterprise]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, 2019,

- Vol. 5 (1330), pp. 70–76, doi: 10.20998/2413-4295.2019.05.09.
13. Ginevičius R., Podvezko V. A feasibility study of multicriteria methods application to quantitative evaluation of social phenomena. *Business: Theory and Practice*, 2008, Vol. 9, pp. 81–87, doi: 10.3846/1648-0627.2008.9.81-87.
 14. Ginevičius R., Podvezko A. The evaluation of financial stability and soundness of Lithuanian Banks. *Ekonomiska istraživanja: znanstveno stručni časopis*, 2013, Vol. 26, no. 2, pp. 191–208.
 15. Ginevičius R., Suhajda K., Šimkūnaitė J. Lithuanian experience of quantitative evaluation of socioeconomic system position by multicriteria methods. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2014, Vol. 110, pp. 952–960, doi:10.1016/j.sbspro.2013.12.941.
 16. Šimelytė A., Antanavičienė J. The effect of investment promotion on FDI flows: A case of the Baltic States. *Business: Theory and Practice*, 2013, Vol. 14, no. 3, pp. 200–208, doi: 10.3846/btp.2013.21.
 17. Beinoraitė Š., Drejeris R. Model for measuring the entrepreneurship of the population. *Business: Theory and Practice*, 2014, Vol. 15, no. 2, pp. 199–209, doi: 10.3846/btp.2014.20.
 18. Krivka A. Complex evaluation of the economic crisis impact on Lithuanian industries. *Journal of Business Economics and Management*, 2014, Vol. 15, pp. 299–315, doi: 10.3846/16111699.2013.867277.
 19. Brauers W., Ginevičius R., Podvezko A. Development of a methodology of evaluation of financial stability of commercial banks. *Panoeconomicus*, 2014, Vol. 61, no. 3, pp. 349–367, doi: 10.2298/PAN1403349B.
 20. Hashemkhani Zolfanir S., Maknoon E., Zavadskas K. Multiple Nash equilibriums and evaluation of strategies. New application of MCDM methods. *Journal of Business Economics and Management*, 2015, Vol. 16, no. 2, pp. 290–305, doi: 10.3846/16111699.2014.967715.
 21. Sorocolat N., Fatieieva L. *Otsinyuvannya yakosti protsesiv systemy upravlinnya bezpekoyu pratsi, z-hidno vymoh mizhnarodnoho standartu ISO 45001:2018* [Quality assessment of the occupational safety management system processes according to the requirements of the ISO 45001:2018 international standard]. *Engineering*, 2022, Vol. 29, pp. 89–96, doi: 10.32820/2079-1747-2022-29.

Відомості про авторів (About authors)

Сороколат Наталія Андріївна – Українська інженерно-педагогічна академія, аспірантка кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-0140-9364; e-mail: n.a.sorokolat@gmail.com.

Sorocolat Nataliia – postgraduate student Department of Automation, Metrology and Energy-efficient Technologies, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-0140-9364; e-mail: n.a.sorokolat@gmail.com.

Фатєєва Ліна Юріївна – Українська інженерно-педагогічна академія, аспірантка кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6460-0772; e-mail: linafat81@gmail.com

Fatieieva Lina – postgraduate student Department of Automation, Metrology and Energy-efficient Technologies, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6460-0772; e-mail: linafat81@gmail.com

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Сороколат Н. А., Фатєєва Л. Ю. Застосування функції помилок для оцінювання якості об'єктів кваліметрії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 53-58. doi:10.20998/2413-4295.2022.04.08.

Please cite this article as:

Sorocolat N., Fatieieva L. Application of the error function for assessing the quality of qualimetry objects. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4 (14), pp. 53–58, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.08.

Надійшла (received) 27.11.2022

УДК 004.4

doi:10.20998/2413-4295.2022.04.09

РОЗРОБКА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІЧНОЇ МОДЕЛІ ТРАНСЛЯЦІЇ ДОКУМЕНТІВ НА РІЗНОМАНІТНИХ ПРИСТРОЯХ

О. А. ТАТАРИНОВА*, О. М. МАРУСЕНКО, В. В. ІСАЄВ

Кафедра комп'ютерного моделювання процесів та систем, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: volodymyr.mietielov@khpі.edu.ua

АНОТАЦІЯ Спроектовано, розроблено та реалізовано веб-застосунок, призначений для трансляції електронних документів на різноманітних пристроях серед аудиторії, що знаходиться на відстані один від одного. Розроблено підходи, алгоритми та сервіс для трансляції документів різного формату на різних пристроях без використання проектора. Для побудови алгоритмів використано класичні методи стиснення та шифрування даних й паралелізму. Програмне забезпечення реалізоване мовою JavaScript з використанням фреймворків Node.js та Vue.js. Також для збереження даних користувачів використано базу даних MongoDB. Для відображення результатів роботи було розроблено сервіс для трансляції з документів різного формату у через мобільний пристрій на інші пристрої. Розроблено зручну архітектуру програмного забезпечення, яка дозволяє з легкістю підтримувати та удосконалювати сервіс у майбутньому. Реалізовано зручний та зрозумілий графічний інтерфейс для взаємодії з користувачем. Як відомо, безпосереднє використання класичних методів та алгоритмів стиснення та шифрування даних дає змогу надійно використовувати та зберігати дані користувачів. З багатьох алгоритмів було використано метод RSA. Метод RSA – це криптографічний алгоритм із відкритим ключем, заснований на обчислювальній складності задачі на множення великих цілих чисел. Також для більшої ефективності у сервісі було розроблено методи паралелізму та мікросервісну архітектуру. Мета їх полягає в тому, щоб розподілити навантаження сервісу на різні підсервіси для більшої ефективності роботи програми.

Ключові слова: веб-застосунок; трансляція документів; алгоритми шифрування; стиснення даних; хмарне сховище

DEVELOPMENT AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF AN ALGORITHMIC MODEL FOR BROADCASTING DOCUMENTS ON VARIOUS DEVICES

О. Т. ТАТАРИНОВА*, О. М. МАРУСЕНКО, В. В. ІСАЄВ

Department of Computer Modeling of Processes and Systems, NTU "KhPI," Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The work designed, developed and implemented a web application intended for the transmission of electronic documents on various devices among the audience located at a distance from each other. The work is devoted to the development of approaches, algorithms and services for broadcasting documents of various formats on various devices without the use of a projector. Classical methods of data compression and encryption and parallelism were used to build the algorithms. The software is implemented in the JavaScript language using the Node.js and Vue.js frameworks. The MongoDB database is also used to store user data. To display the results of the work, a service was developed for broadcasting documents of various formats through a mobile device to other devices. A convenient software architecture has been developed, which allows you to easily maintain and improve the service in the future. A convenient and clear graphical interface for interaction with the user has been implemented. As you know, the direct use of classical methods and algorithms of data compression and encryption enables reliable use and storage of user data. Among many algorithms, the RSA method was used. The RSA method is a public-key cryptographic algorithm based on the computational complexity of the problem of multiplying large integers. Also, for greater efficiency in the service, parallelism methods and microservice architecture were developed. Their purpose is to distribute the load of the service on different subservices for greater efficiency of the program.

Keywords: web application; transmission of documents; encryption algorithms; data compression; cloud storage

Вступ

На сьогодні методи роботи з електронними документами набувають все більшої актуальності у зв'язку з впровадженням інформаційно-комп'ютерних технологій у документообіг організації.

У зв'язку з переходом на електронний документообіг виникли три дуже важливих питання щодо аспектів зберігання та обробки електронних документів – це пошук оптимальної технології, яка надає різноманітний функціонал по роботі з документами; вибір надійного, захищеного носія інформації, що забезпечує її тривале зберігання; трансляція документів на різноманітних пристроях.

На даний момент існує декілька методів роботи з електронними документами, залежно від технології зберігання:

- зовнішні носії;
- локальний сервер чи локальний комп'ютер у створенні;
- програма електронного архіву;
- хмарна система.

Світова практика демонструє, що дедалі більше зарубіжних архівів переходить на зберігання електронних документів із застосуванням хмарних систем, що може сприяти вдосконаленню проведення презентації або прямій трансляції на будь-якому зібранні.

Використання хмарних технологій розглянуто у роботах Т.І. Вакалюк [1], питанням використання хмарних сховищ OneDrive та Dropbox присвячені дослідження І.В. Герасименко, К.І. Журавель, А.С. Паламарчук [2], огляду функціональних можливостей хмарних сервісів для створення інтерактивних мультимедійних презентацій присвячено статтю Т.В. Бондаренко [3].

Актуальність роботи обумовлена необхідністю мати можливість трансляції електронних документів при різних обставинах, маючи будь-який пристрій з виходом у мережу інтернет.

Мета роботи

Роботу присвячено розробці сервісу, призначеного для трансляції, взаємодії та презентації електронних документів через будь-який пристрій, який підключений до глобальної мережі за наявності браузера. При цьому необхідно розробити алгоритмічну модель трансляції документів, яка буде надавати можливість надійно передавати документи зі стисненням даних.

На основі огляду методів кодування було обрано алгоритм Діффі-Хеллмана, метод RSA, арифметичне кодування та алгоритм розробки хмарного сховища.

Алгоритм арифметичного кодування було обрано у зв'язку з тим, що він має структуру алгоритму для стиснення даних без втрат. Отже використання цього методу дозволить зробити стиснення максимально ефективним, не використовуючи зайвого місця на диску.

Алгоритм Діффі-Хеллмана було обрано у зв'язку з тим, що він дає змогу двом і більше сторонам отримати спільний секретний ключ, використовуючи захищений від прослуховування канал зв'язку.

Метод RSA було обрано у зв'язку з тим, що цей алгоритм за аналізом літературних джерел [4–8] є максимально зломостійким, ніж інші алгоритми.

Виклад основного матеріалу

Програмний засіб, розроблений для трансляції документів на різноманітних пристроях, використовує алгоритм, який складається з оновлення та перетворення даних. Він складається з трьох кроків. Першим кроком є реєстрація або вхід користувача. Другий – завантаження та зміна даних (зображень, документів тощо). На третьому кроці відбувається трансляція завантаженої інформації.

Перший етап роботи програми наведено на рис.1 за допомогою діаграми класів.

Кожен користувач — це звичайний об'єкт, розташований у базі даних MongoDB, що містить ім'я (name), адресу електронної пошти (mail), пароль (password), дату (date – потрібні нам дані) (рис. 1). Після реєстрації користувач додається до бази даних з інформацією, наведеною на рис. 2.

Відповідно до запиту (рис. 2) відбувається етап реєстрації користувача. Далі у цьому коді реалізовані параметри пароля для забезпечення безпеки (наприклад, пароль має бути не менше 6 цифр і містити великі літери та символи). Він також перевіряє ідентичність даних користувача, щоб переконатися, що немає ідентичних користувачів.

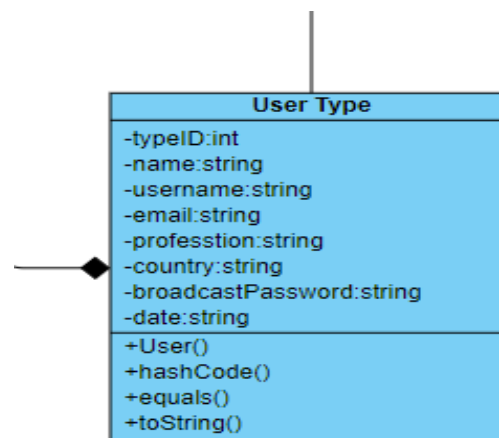


Рис. 1 – Створення користувача

Другий етап алгоритму показує як дані (зображення, документи тощо) були завантажені та змінені. За допомогою функції (рис. 3) можна додати новий файл [9].

Алгоритм пошуку та функції форматування тексту використовуються для визначення імені файлу (для подальшого використання), а сам файл та його параметри включаються у файл products.json. Для безпеки використовується шифрування md5. Крім того, у функції створюється нова папка з назвою електронної пошти користувача, і тут зберігаються всі документи, завантажені клієнтом.

Третій етап розробленого алгоритму показує яким чином транслюються завантажені дані.

Метод презентації (рис. 4) реалізує трансляцію зображення на інші пристрої. Дана система безпеки, яка використовує закритий ключ, створений самим користувачем. Іншими словами, на сеанс можуть потрапити лише запрошені гості.

Алгоритм Діффі-Хеллмана – криптографічний протокол, який дозволяє двом сторонам з парами відкритих/закритих ключів на еліптичних кривих обмінюватися секретним ключем, використовуючи несанкціонований канал зв'язку [10]. Цей секретний ключ може бути використаний як для шифрування подальшої комунікації, так і для формування нового ключа, який потім може бути використаний для подальшої комунікації з використанням симетричних алгоритмів шифрування.

Під час роботи алгоритму, кожна сторона:

- 1) генерує випадкове натуральне число a – закритий ключ;
- 2) спільно з віддаленою стороною встановлює відкриті параметри p і g ; (зазвичай значення p і g генеруються на одній стороні та передаються іншій), де p є випадковим простим числом; g є першоподібним коренем за модулем p ;
- 3) обчислює відкритий ключ A , використовуючи перетворення над закритим ключем

$$A = g^a \bmod p, \quad (1)$$

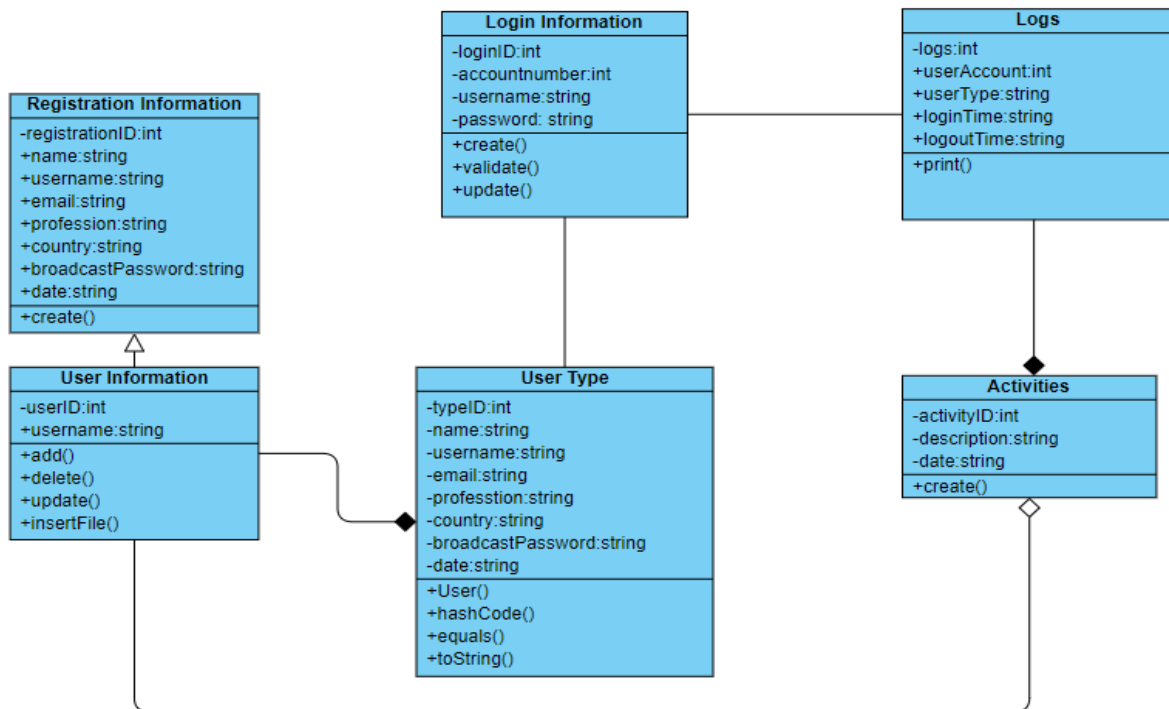


Рис. .2 – Реєстрація користувача

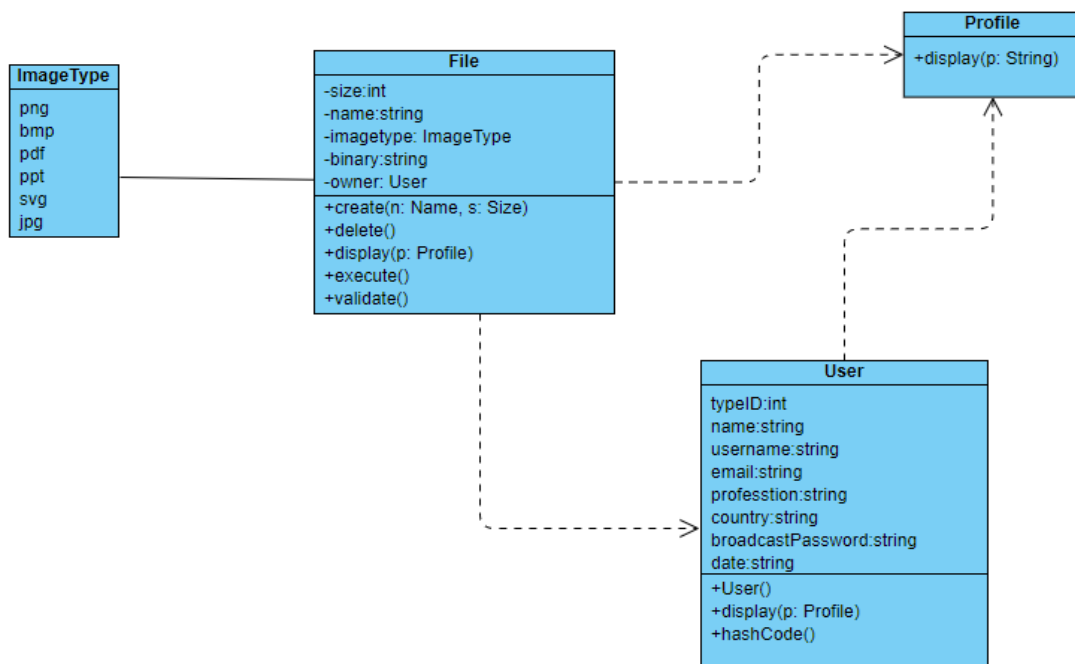


Рис. 3 – Додавання нового файлу

4) обмінюється відкритими ключами з віддаленою стороною;

5) обчислює спільний секретний ключ K , використовуючи відкритий ключ віддаленої сторони B і свій закритий ключ a

$$K = B^a \text{ mod } p. \quad (2)$$

Слід зазначити, що алгоритм Діффі-Хеллмана працює тільки на лініях зв'язку, які надійно захищені

від змін. Якби його можна було застосувати до будь-якого відкритого каналу, це б уже усунуло проблему розподілу ключів і, можливо, замінило б всю асиметричну криптографію. Однак, якщо дані у каналі можна змінити, існує явна ймовірність того, що злоумисник «людина посередник» ввійде в процес генерації ключів, використовуючи ту саму схему, що й асиметрична криптографія.

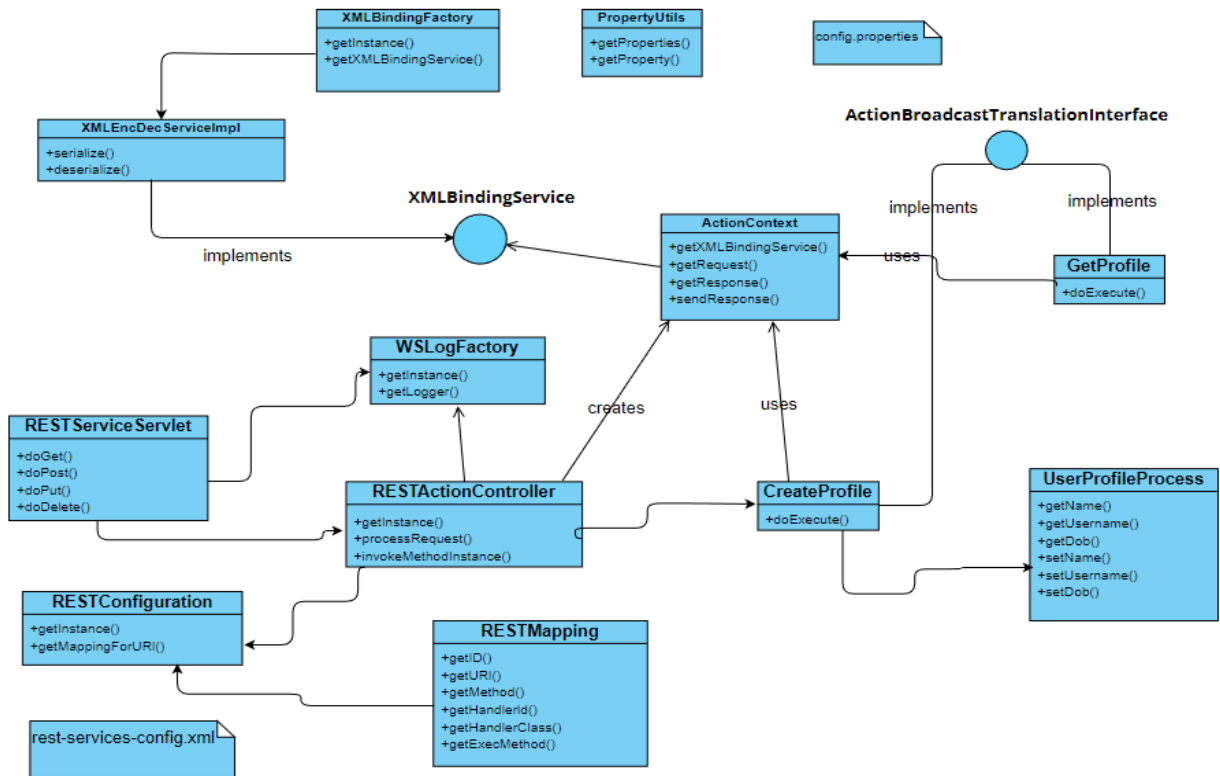


Рис. 4 – Трансляція презентації

Розроблена програмна реалізація представленої алгоритмічної моделі трансляції електронних документів орієнтована на застосування операційної системи Windows, Linux та MacOS з використанням мови програмування JavaScript. Програма використовує стандартні бекенд та фронтенд бібліотеки JavaScript, фреймворк Node.js, Express.js, Vue.js та базу даних MongoDB [11,12].

Додаток працює з вхідними даними користувача. Після того, як користувач введе свою інформацію або зареєструється у системі, він повинен вибрати, що завантажити (це може бути фото, документ тощо), а веб-додаток зберігає дані в базу

даних сервісу. Зберігаючи важливі документи, файли чи іншу інформацію у кінці веб-додатку, користувач може продовжувати ним користуватися.

Для більшої наглядності роботи веб-сервісу було створено діаграму прецедентів, яка представлена на рис.5.

Для підтримки та оновлення проекту була використана SOLID архітектура – це п'ять принципів об'єктно-орієнтованого програмування, які визначають архітектуру програми: принцип єдиної відповідальності, відкритий закритий принцип, принцип підстановки Ліскова, принцип сегрегації інтерфейсу та принцип інверсії залежностей [13].

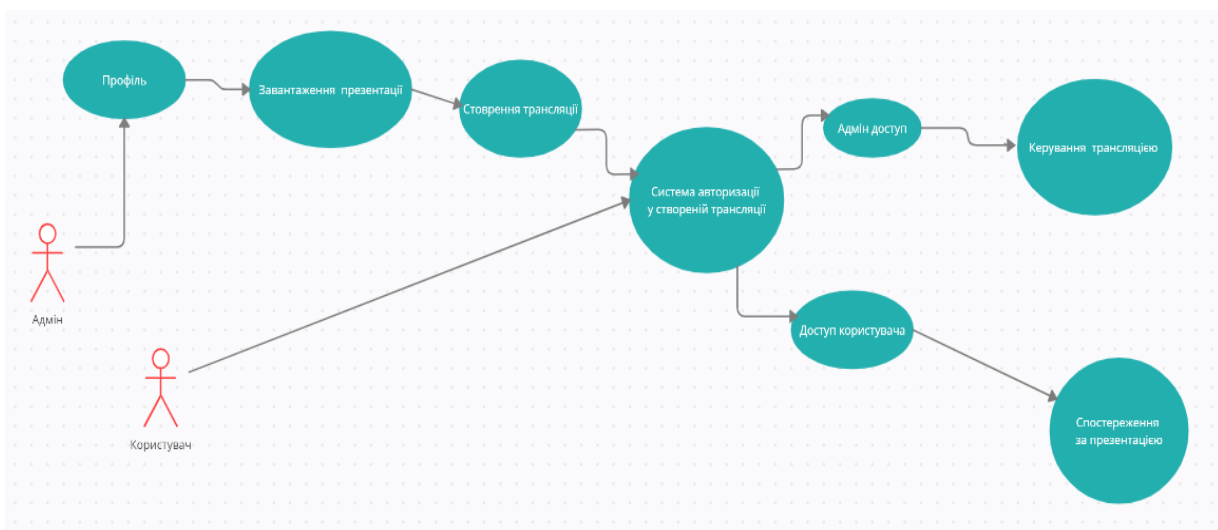


Рис. 5 – Діаграма прецедентів

Для реалізації хмарного сховища було реалізовано наступні основні функції та можливості:

- пакетне завантаження відеофайлів і зображень на S3;
- низькорівневу аутентифікацію мультимедійних файлів за допомогою кодеків;
- попередній перегляд медіафайлів;
- гнучкі параметри аутентифікації файлів;
- конфігурацію примірника на основі домену для кількох клієнтів;
- відстежування прогресу і стан збереження кожного файлу;
- підтримку плагіна JQuery-Fileupload.

Обговорення результатів

Розроблені алгоритм та програмна реалізація для трансляції та взаємодії документів різного формату на різних пристроях, в яких використано методи шифрування (алгоритм Діффі-Хелмена та алгоритми RSA і DSA) та алгоритм арифметичного кодування, також розроблені інші додаткові функції (редагування, створення аватарки, згрупувати документи, збереження, видалення тощо) для сервісу. Даний сервіс відрізняється зручною архітектурою, яка дозволяє з легкістю підтримувати та удосконалювати сервіс у майбутньому. Реалізовано зручний та зрозумілий графічний інтерфейс для взаємодії з користувачем.

Важливим етапом створення будь-якої програми є тестування. У даній роботі проведено тестування на можливі критичні ситуації. Повний цикл тестувань включає в себе: тестування системи, блоків, функціональності, зручності використання, тестування безпеки, кросбраузерне та кросплатформне тестування. Серед багатьох тестів, що використовуються, виділено конкретні тестові точки.

Також було проведено функціональне, кросбраузерне та кросплатформне тестування, щоб перевірити, як додаток працює під час роботи в різних браузерах і пристроях.

Зауважимо, що був проведений функціональний, кросбраузерний та мультиплатформний тест для перевірки, як буде вести себе веб-застосунок, якщо його запустити на різних браузерах та пристроях.

Можна відзначити, що оптимізація сервісу дозволяє користувачам насолоджуватися швидкістю запитів і роботою продукту. Цей сервіс має систему захисту від злому. Усі паролі, створені користувачем для презентацій та аккаунтів, зашифровані. Це додає додаткову безпеку додатку.

Висновки

У роботі описано підхід до програмної реалізації розробленої алгоритмічної моделі трансляції електронних документів на різноманітних пристроях, що дозволяє ефективно використовувати сервіс за рахунок розроблених методів шифрування, паралелізму та мікросервісної архітектури. Всі

операції проводяться з використанням баз даних, у яких зберігаються дані користувачів та завантажені медіа файли. Програмний засіб модернізується із застосуванням алгоритмів оцінювання даних та використовується для проведення презентацій на різних пристроях.

Список літератури

1. Вакалюк Т. А. Огляд існуючих моделей хмарних послуг для використання у вищих навчальних закладах. *Тези доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології – 2016» (22–23 квітня 2016 р.)*. Житомир: ЖДТУ. 2016. С. 215–217.
2. Герасименко І. В., Журавель К. І., Паламарчук О. С. Комплексне використання хмарних сервісів в електронному навчальному курсі. *Science and Education a New Dimension. Pedagogy and Psychology*. 2015. III(37). Issue 75.
3. Бондаренко Т. В. Особливості використання програмного засобу Prezi у процесі розробки навчальних презентацій. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2018. Том 63, №1. С. 1–11. doi:10.33407/itlt.v63i1.1907.
4. Neha Bansal, Sukhdeep Singh. RSA Encryption and Decryption System. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. 2020. Volume 6, Issue 5. P. 109–113. doi: 10.32628/CSEIT206520.
5. Gupta D., Biswas G., Nandan R. Security Weakness of a Lattice-based Key Exchange Protocol. *In Proceedings of the 2018 4th International Conference on Recent Advances in Information Technology*. Dhanbad, India. 15–17 March 2018. P. 1–5.
6. Priya N. and Kannan M. Comparative Study of RSA and Probabilistic Encryption. *International Journal Of Engineering And Computer Science*. 2017. Vol. 6. No 1. P. 19867–19871. doi: 10.18535/ijecs/v6i1.04.
7. Meneses F., Fuentes W., José Sancho, Salvador S., Flores D., Aules H., Castro F. Torres J., Miranda A., Nuela D. RSA Encryption Algorithm Optimization to Improve Performance and Security Level of Network Messages. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. 2016. Vol. 16. No. 8. P. 55–62.
8. Abdeldaym R. S., Abd Elkader H. M., Hussein R., Modified RSA Algorithm Using Two Public Key and Chinese Remainder Theorem. *I.J. of Electronics and Information Engineering*. 2019. Vol. 10. No. 1. P. 51–64. doi: 10.6636/IJEIE.201903/51-64.
9. Cai M. A., Chervenak M. Peer-to-Peer replica location service based on a distributed hash table. *Conference: Supercomputing, Proceedings of the ACM/IEEE SC2004 Conferenc*. 2004. P. 56. doi:10.1109/SC.2004.7.
10. Noor Sattar Noor, Dalal Abdulmohsin Hammood, Ali Al-Naji, Javaan Chahl. A Fast Text-to-Image Encryption-Decryption Algorithm for Secure Network Communication. *Computers*. 2022. 11. 3. P. 39. doi: 10.3390/computers11030039.
11. Eric Bush. *Node.js, Mongo DB, React, React Native Full-Stack Fundamentals and Beyond*. Blue Sky Productions, 2018. 394 p.
12. Amit Phaltankar, Juned Ahsan, Michael Harrison, Liviu Nedov. *MongoDB Fundamentals: A hands-on guide to using MongoDB and Atlas in the real world*. Packt Publishing Ltd, 2020. 748 p.

13. Addy Osmani. Learning JavaScript Design Patterns: A JavaScript and jQuery Developer's Guide. O'Reilly Media; 1 edition (2012); Creative Commons Licensed, 2021. 254 p.

References (transliterated)

- Vakalyuk T. A. Oglyad isnuuyuchy`x modelej` xmary`x poslug dlya vy`kory`stannya u vy`shhy`x navchal`ny`x zakladax [Overview of existing models of cloud services for use in higher education institutions]. *Tezy` dopovidej VIII Mizhnarodnoyi nauково-tekhnichnoyi konferenciyi «Informacijno-komp'yuterni tekhnologiyi – 2016» (22–23 kvitnya 2016 r.)*. Zhy`tomy`r. ZhDTU, 2016, pp. 215–217.
- Gerasy`menko I. V., Zhuravel` K. I., Palamarchuk O. S. Kompleksne vy`kory`stannya xmary`x servisiv v elektronnomu navchal`nomu kursi [Complex use of cloud services in an electronic training course]. *Science and Education a New Dimension. Pedagogy and Psychology*, 2015, III(37), Issue 75.
- Bondarenko T. V. Osobly`vosti vy`kory`stannya programnogo zasobu Prezi u procesi rozrobky` navchal`ny`x prezentacij. [Peculiarities of using Prezi software in the process of developing educational presentations]. *Informacijni tekhnologiyi i zasoby` navchannya*, 2018, Vol. 63, no. 1, pp. 1–11, doi:10.33407/itlt.v63i1.1907.
- Neha Bansal, Sukhdeep Singh. RSA Encryption and Decryption System. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 2020, Vol. 6, Issue 5, pp. 109–113, doi: 10.32628/CSEIT206520.
- Gupta D., Biswas G., Nandan R. Security Weakness of a Lattice-based Key Exchange Protocol. *In Proceedings of the 2018 4th International Conference on Recent Advances in Information Technology*. Dhanbad, India, 15–17 March 2018, pp. 1–5.
- Priya N. and Kannan M., Comparative Study of RSA and Probabilistic Encryption. *International Journal Of Engineering And Computer Science*, 2017, Vol. 6, no 1, pp. 19867–19871, doi: 10.18535/ijecs/v6i1.04.
- Meneses F., Fuertes W., José Sancho, Salvador S., Flores D., Aules H., Castro F. Torres J., Miranda A., Nuela D. RSA Encryption Algorithm Optimization to Improve Performance and Security Level of Network Messages. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 2016, Vol. 16, no. 8, pp. 55–62.
- Abdeldaym R. S., Abd Elkader H. M., Hussein R., Modified RSA Algorithm Using Two Public Key and Chinese Remainder Theorem. *I.J. of Electronics and Information Engineering*, 2019, Vol. 10, no. 1, pp. 51–64, doi: 10.6636/IJEIE.201903/51-64.
- Cai M. A., Chervenak M. Peer-to-Peer replica location service based on a distributed hash table. *Conference: Supercomputing, Proceedings of the ACM/IEEE SC2004 Conferenc*, 2004, pp. 56, doi: 10.1109/SC.2004.7.
- Noor Sattar Noor, Dalal Abdulmohsin Hammood, Ali Al-Naji, Javaan Chahl. A Fast Text-to-Image Encryption-Decryption Algorithm for Secure Network Communication. *Computers*, 2022, 11, 3, pp. 39, doi: 10.3390/computers11030039.
- Eric Bush. Node.js, Mongo DB, React, React Native Full-Stack Fundamentals and Beyond. *Blue Sky Productions*, 2018. 394 p.
- Amit Phaltankar, Juned Ahsan, Michael Harrison, Liviu Nedov. MongoDB Fundamentals: A hands-on guide to using MongoDB and Atlas in the real world. *Packt Publishing Ltd*, 2020. 748 p.
- Addy Osmani. Learning JavaScript Design Patterns: A JavaScript and jQuery Developer's Guide. O'Reilly Media. 1 edition (2012). *Creative Commons Licensed*, 2021. 254 p.

Відомості про авторів (About authors)

Татарінова Оксана Андріївна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-3090-8469; e-mail: oksana.tatarinova@kphi.edu.ua.

Tatarinova Oksana – Ph. D., Associate Professor of the Department of Computer Modelling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3090-8469; e-mail: oksana.tatarinova@kphi.edu.ua.

Марусенко Олексій Миколайович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-6911-2500; e-mail: Oleksii.Marusenko@kphi.edu.ua.

Marusenko Oleksii – Assistant of the Department of Computer Modelling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6911-2500; e-mail: Oleksii.Marusenko@kphi.edu.ua.

Ісаєв Владислав Володимирович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; e-mail: brodskiy.gleb@gmail.com.

Isaiev Vladyslav – Student of the Department of Computer Modelling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: vladyslav.isaiev@infiz.kphi.edu.ua.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Татарінова О. А., Марусенко О. М., Ісаєв В. В. Розробка та програмна реалізація алгоритмічної моделі трансляції документів на різноманітних пристроях. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 59–64. doi:10.20998/2413-4295.2022.04.09.

Please cite this article as:

Tatarinova O., Marusenko O., Isaiev V. Development and software implementation of an algorithmic model for broadcasting documents on various devices. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4(14), pp. 59–64, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.09.

Надійшла (received) 01.12.2022

УДК 66.094.942+66.095.83+544.478

doi:10.20998/2413-4295.2022.04.10

ВПЛИВ КАТАЛІЗАТОРІВ НА РЕАКЦІЇ МІЖ ТРИ- І ДІЕТАНОЛАМІНАМИ ТА ЕТИЛОЛЕАТОМ

Р. В. ДАНИЛЮК, С. Р. МЕЛЬНИК*

кафедра технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА
*e-mail: stapan.r.melnyk@lpnu.ua

АНОТАЦІЯ Алканоламіди та естераміни є вихідними матеріалами для одержання поверхнево-активних речовин, миючих та косметичних засобів, фармацевтичних препаратів, барвників. Досліджено закономірності взаємодії етилолеату та суміші три- та діетаноламінів (вміст діетаноламіну – 21 мас.%) у присутності каталізаторів Бренстеда та Льюїса. Як каталізатори застосовували катіоніт КУ-2-8, аніоніт АВ-17-8 та гідроксид калію, оксалат нікелю, катіоніт КУ-2-8 з іммобілізованими іонами Ni^{2+} та цей іоніт, додатково оброблений 0,1 М розчином лугу протягом 1 год, а також *p*-толуенсульфонат олова (II). Для зміщення рівноваги реакції трансестерифікації процес вели в нестационарних умовах з відгонкою з реакційної суміші утвореного етанолу. Встановлено що досліджені каталізатори за незначним винятком характеризуються відносно низькою швидкістю перетворення реагентів. Показано, що ефективність дії катіоніту КУ-2-8 в Н-формі дуже залежить від температури та, більшою мірою, від мольного співвідношення етилолеату і три- та діетаноламінів. Дослідження впливу співвідношення реагентів дало змогу зробити припущення, що процеси масообміну суттєво позначаються на показниках реакції між етилолеатом і етаноламінами. Показано, що за однакових умов близьку до катіоніту КУ-2-8 каталітичну активність виявляють аніоніт АВ-17-8 та *p*-толуенсульфонат олова (II). Модифікація катіоніту КУ-2-8 іммобілізацією іонів нікелю децю покращує його каталітичні властивості, а подальша обробка одержаного каталізатора розчином лугу навіть децю зменшує конверсію етилолеату. Встановлено, що найвищу активність як каталізатор реакції між етилолеатом та три- і діетаноламінами виявляє оксалат нікелю. Такий ефект можна пояснити високими електроноакцепторними властивостями оксалат-аніону, який зменшує електронну густину на катіоні Ni^{2+} . Як наслідок у присутності цього каталізатора конверсія естеру становить 21,9%. Отримані результати дали змогу зробити висновок про потенційну перспективність застосування катіоніту КУ-2-8 у Н-формі та оксалату нікелю як каталізаторів реакції між етилолеатом і три- та діетаноламінами.

Ключові слова: триетаноламін; діетаноламін; етилацетат; каталіз; трансестерифікація; аміноліз

THE CATALYSTS IMPACT ON THE TRI- AND DIETHANOLAMINE AND ETHYL OLEATE INTERACTION

R. DANYLIUK, S. MELNYK

Department of Organic Products Technology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

ABSTRACT Alkanolamides and ester amines are raw materials for manufacturing surfactants, detergents and cosmetics, pharmaceuticals, and dyes. We investigated the regularities of the interaction between ethyl oleate and a mixture of tri- and diethanolamines (diethanolamine content was 21 wt.%) in the presence of Brønsted and Lewis catalysts. The cation exchange resin KU-2-8, anion exchange resin AB-17-8, potassium hydroxide, nickel oxalate, cation exchange resin KU-2-8 with immobilized Ni^{2+} ions, cation exchange resin KU-2-8 with immobilized Ni^{2+} ions treated with a 0.1 M alkali solution within 1 hour, and tin (II) *p*-toluenesulfonate were used as catalysts. The reaction was carried out in non-stationary conditions with the formed ethanol distillation from the reaction mixture to shift the transesterification reaction equilibrium. It was established that the studied catalysts, with a few exceptions, are characterized by a relatively low rate of reagent conversion. It is shown that the effectiveness of cation exchange resin KU-2-8 in the H-form depends significantly on the temperature and, to a greater extent, on the ethyl oleate and tri- and diethanolamines molar ratio. The study of the reagent ratio influence made it possible to assume that mass transfer processes significantly affect the parameters of ethyl oleate and ethanolamines interaction. It is shown that, under the same conditions, catalytic activity similar to cation exchange resin KU-2-8 is exhibited by anion exchange resin AB-17-8 and tin (II) *p*-toluenesulfonate. Modifying cation exchange resin KU-2-8 by immobilized nickel ions improves its catalytic properties, and subsequent treatment of the obtained catalyst with an alkali solution even slightly reduces the conversion of ethyl oleate. It was established that nickel oxalate exhibits the highest activity as a catalyst for the reaction between ethyl oleate and tri- and diethanolamines. This effect can be explained by the high electron-accepting properties of the oxalate anion, which reduces the electron density of the Ni^{2+} cation. As a result, in the presence of this catalyst, the ester conversion is 21.9%. The obtained results made it possible to conclude the potential prospects of using cation exchange resin KU-2-8 in H-form and nickel oxalate as catalysts for ethyl oleate and tri- and diethanolamines interaction.

Keywords: triethanolamine; diethanolamine; ethyl acetate; catalysis; transesterification; aminolysis

Вступ

Алканоламіди та естераміни застосовують для одержання неіоногенних поверхнево-активних речовин, миючих та косметичних засобів,

фармацевтичних препаратів, барвників. Основним способом їх одержання є взаємодія аміноспиртів з карбоновими кислотами та їх естерами [1,2].

Для інтенсифікації взаємодії естерів з етаноламінами застосовують гетерогенні та гомогенні каталізatori. Як гомогенні каталізatori використовують кислоти Льюїса та Бренстеда, зокрема трибромід бору та хлоридну, фосфатну, сульфатну, *n*-толуенсульфонову кислоти, а як гетерогенні – основному солі лужних металів, комплекси металів, цеоліти тощо [3].

Основні каталізatori виявляють вищу активність, є доступнішими і поширенішими ніж кислотні, тому більшість промислових процесів надають перевагу таким каталізаторам як алкоксиди лужних металів, гідроксиди та карбонати калію [4].

Використання алкохолів лужних металів та гідроксидів у реакціях метилових естерів вищих жирних кислот з етаноламінами забезпечує високий вихід і чистоту алкіламіду. Реакцію проводили за температури 90–150 °С протягом 1–6 год за мольного співвідношення етаноламін : естер – 1 : 1,3 [5].

У роботі [6] наведені результати використання метоксиду натрію як каталізатора амінолізу метилліонеату моно- і діетаноламінами за температури 30 °С. За 1,5 год реакції вихід аміду становив 97,2 %. Автори стверджують, що реакція амінолізу є домінуючою над реакцію трансестерифікації. Щоб зменшити вплив трансестерифікації і повніше провести аміноліз з отриманням цінних амідів, пропонують оптимізацію реакції щодо впливу розчинника, температури і складу суміші реагентів.

У роботі [7] наведені результати взаємодії етаноламіну з метиловим естером пальмітинової кислоти в присутності каталізатора цеоліту H-Beta-22. За температури 180 °С та 3 год реакції конверсія естеру становила 17%. Для порівняння при взаємодії етаноламіну з кислотою було досягнуто конверсії кислоти 87 %.

Використання немодифікованого оксиду заліза (III) на різних носіях забезпечує за 1 год реакції моноетаноламіну зі стеариновою кислотою за температури 120 °С конверсію кислоти 17 %. Водночас, у присутності модифікованого Fe₂O₃ на носії Ferrierite-20-SSIE за температури 140 °С та 1 год реакції досягається 98 % селективності за амідом за конверсії стеаринової кислоти 61 % [8].

Хлорид холіну каталізує взаємодію моноетаноламіну з метиловими естерами таких кислот, як пальмітинової, міристинової, стеаринової, лакринової без розчинника в атмосфері азоту. Протягом 1 год за температури від 90 °С до 110 °С за мольного співвідношення метиловий естер лауринової кислоти : моноетаноламін – 1 : 1,5 досягаються конверсія кислоти 98 % та селективність за амідом 100 % [9].

Широкого застосування набуває використання ферментативних каталізаторів взаємодії аміноспиртів та естерів. Зокрема ліпаза є представником зелених каталізаторів. У роботі [10] повідомляють про каталіз ферментним препаратом Lipozyme 435 взаємодії

етаноламіну з етиловим естером ейкозапентаїнової кислоти. Встановлено, що за температури 40–70 °С та часу реакції 1–2 год, співвідношенні естер : аміноспирт – 2 : 3, вихід етаноламіду становить 62,3 %. Однак основним недоліком є малий час життя самого каталізатора та його висока вартість.

У роботі розглянуто використання MgAl-шаруватого подвійного гідроксиду (MgAl-LDH), який містить велику кількість центрів Бренстеда як каталізатора реакції між аміноспиртами та естерами. Загальна формула каталізатора $[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)_2]^{x+}[A^{n-}]^{x/n} \cdot yH_2O$, де M^{2+} та M^{3+} – іони двовалентного та тривалентного металів, а A^{n-} – інтеркальований аніон. MgAl-шаруватий подвійний гідроксид каталізує реакцію між метилстеарату та етаноламіну. За температури 393 К конверсія метилстеарату становила 87 %, збільшення температури до 413 К, призвело до незначного збільшення конверсії естеру [11].

У роботі [12] для прямого перетворення естерів на амід за відсутності розчинників пропонують застосовувати каталізатора нітрат амонію. Цей каталізатор забезпечує вихід цільових продуктів в межах 85–99 %. Автори також вказують про ефективність застосування каталізаторів комплексів металів Sb(OEt)₃, Zr(Ot-Bu)₄HOAt, AlMe₃, NaOMe, KOt-Bu, DABAL-Me₃, MgX₂, InI₃, цинкового пилу, N-гетероциклічного карбіну, діазабіциклоундецену, триазабіцикло[4.4.0]дек-5-ен, і 1,2,4-тріазол-діазабіциклоундецену для реалізації таких процесів.

Отже, каталізatori відіграють важливу роль під час взаємодії етаноламінів та естерів. Їх використання забезпечує як вищу інтенсивність перетворення реагентів, так і кращі технологічні показники процесу – конверсію реагентів та вихід цільових продуктів, зокрема. Насамперед це стосується реакцій між моноалканоламінами та естерами та меншою мірою – реакцій за участю три- та діетаноламінів [13].

Водночас, проблемою використання гомогенних каталізаторів є складність їх виділення з продуктів реакції, а гетерогенні каталізatori забезпечують нижчу конверсію. Тому пошук та розроблення ефективних каталізаторів взаємодії етаноламінів та естерів залишається актуальною проблемою технології органічних речовин.

Мета роботи

Метою роботи було дослідити закономірності взаємодії етилолеату з сумішшю три- і діетаноламінів у присутності різних каталізаторів.

Виклад основного матеріалу

Як реагенти використовували триетаноламін марки В (вміст діетаноламіну 21 мас. %); етилолеат, синтезований з відповідної кислоти і спирту, з домішкою олеїнової кислоти (КЧ = 3,6 мг КОН/г). Як

каталізатори використовували основи і кислоти Бренстеда та Льюїса, такі як катіоніт КУ-2-8 (ГОСТ 20298-74), аніоніт АВ-17-8 (ГОСТ 20301-74) та гідроксид калію (марка ч.), оксалат нікелю (марка ч.), катіоніт КУ-2-8 з іммобілізованими іонами Ni^{2+} та цей іоніт, додатково оброблений 0,1 М розчином лугу протягом 1 год, а також *n*-толуенсульфонат олова (II).

Визначене кондуктометричним методом аміне число триетаноламіну, а фактично суміші етаноламінів (ЕА), становило 259,7 мг HCl/г, що відповідало їхній середній молекулярній масі 140,6.

Етилолеат (ЕО) синтезували з олеїнової кислоти та надлишку етилового спирту до конверсії кислоти 96 %. Після нейтралізації непрореагованої олеїнової кислоти обробкою реакційної суміші аніонітом АВ-17-8 в ОН-формі і промивання дистильованою водою вміст олеїнової кислоти в ньому становив 1,8 мас. %. Наявність олеїнової кислоти не вважали перешкодою для проведення процесу, адже вона здатна утворювати з три- та діетаноламінами ті самі продукти, що й етилолеат.

Закономірності взаємодії етилолеату з етаноламінами досліджували в нестационарних умовах з відгонкою утвореного етанолу. Реакцію проводили в установці, яка складалася з термостатованої на бані з силіконовою оливою круглодонної колби-реактора, пастки Діна-Старка та зворотного холодильника. Реакційне середовище, яке знаходилося за умови кипіння, додатково перемішували магнітною мішалкою з частотою обертання 400 об·хв⁻¹.

Інтенсивність перебігу реакції визначали за накопиченням в реакційній суміші та в дистилаті в пастці етанолу, вміст якого визначали хроматографічно. Хроматографічний аналіз виконували за допомогою хроматографа ЛХМ-80 з детектором за теплопровідністю. Вміст спирту визначали в сталевій колонці завдовжки 1 м і діаметром 3 мм, заповненій нерухомою фазою 5 % Silicone SE30 на Chromaton N-AW із розміром частинок 0,125–0,160 мм.

Вплив мольного співвідношення реагентів досліджено в межах ЕО : ЕА – (2,9–1,1) : 1 в присутності катіоніту КУ-2-8 як каталізатора за середньої температури реакції – 131–148 °С. Вміст каталізатора становив 1 мас. %. За час реакції 180–300 хв була досягнута конверсія етилолеату від 5,1 до 51,3 % (табл. 1).

Результати дослідження реакції між етилолеатом та етаноламінами в присутності вказаних вище каталізаторів наведені в табл. 2. Очевидно, що за 300 хв реакції для мольного співвідношення ЕО : ЕА – (2,9–3,1) : 1 найвища конверсія етилолеату досягається в присутності оксалату нікелю, а найнижча – за умови каталізу реакції *n*-толуенсульфонатом олова (II).

Таблиця 1 – Вплив мольного співвідношення на технологічні показники реакції між етилолеатом та етаноламінами в присутності КУ-2-8. $\omega(KU-2-8)$ – 1,0 мас. %

ЕО : ЕА (мол.)	Середня т-ра р-ії, °С	Час, хв	К(ЕО), %
1,1	131	180	24,8
2,1	140	205	51,3
2,9	148	300	5,1

Таблиця 2 – Технологічні показники процесу взаємодії етилолеату і етаноламінів у присутності різних каталізаторів. Час – 300 хв, середня температура реакції – 150±2 °С

Каталізатор	$\omega(\text{кат})$, мас. %	ЕО : ЕА (мол.)	К(ЕО), %
КУ-2-8	1,1	2,9	5,1
КУ-2-8- Ni^{2+}	1,0	2,9	11,6
КУ-2-8- $Ni^{2+}OH^-$	1,1	3,1	10,5
NiC_2O_4	0,9	3,1	21,9
$Sn(CH_3C_6H_5SO_3)_2$	1,7	2,9	4,9
АВ-17-8	1,1	3,1	6,3
КОН	0,3	1,5	19,2

Застосування як каталізатора гідроксиду калію, який, на відміну від інших досліджених гетерогенних каталізаторів за вмісту 0,3 мас. % розчиняється в реакційній суміші, забезпечує конверсію етилолеату 19,2 %. Водночас, такий результат досягається за вдвічі меншого надлишку естеру (табл. 2).

Обговорення результатів

Вищевказані каталізатори, які використовували в дослідженнях, виявляють досить високу активність у реакціях трансестерифікації тригліцеридів нижчими аліфатичними спиртами [14,15]. Оскільки саме це перетворення є основним під час взаємодії етилолеату і три- та діетаноламінів, це виправдовувало доцільність виконаних експериментів. Аналогічного типу каталізатори були досліджені в реакціях між три- та діетаноламінами та такими естерами як бутилпропіонат, бутилацетат, бутилолеат і, частково, етилалеат [16]. Саме для етилолеату було отримано кращі результати, що зумовило інтерес для продовження досліджень нових каталізаторів для його взаємодії з етаноламінами.

Водночас, встановлено що досліджені каталізатори за незначним винятком характеризуються відносно низькою швидкістю перетворення реагентів.

Зокрема ефективність дії катіоніту КУ-2-8 в Н-формі дуже залежить від температури та, більшою мірою, від мольного співвідношення етилолеату і три-

та діетаноламінів. Так, за умови мольного надлишку естеру 2,9 : 1 і максимальних середньої температури реакції конверсія етилолеату за 300 хв досягає всього 5,1 % (табл. 1). Зменшення надлишку естеру навіть при зниженні температури реакції забезпечує значно вищий ступінь перетворення етилолеату, який за 205 хв реакції за мольного надлишку естеру 2,1 : 1 і за температури 140 °C становить 51,3 %. Такий вплив параметрів на перебіг процесу можна пояснити впливом масообміну. Зокрема, етилолеат і етаноламіни є практично взаємно нерозчинними, тому реакція на початкових стадіях є гетерофазною, а висока в'язкість обох компонентів реакційної суміші додатково погіршує контакт між реагентами.

Модифікація катіоніту КУ-2-8 іммобілізацією іонів нікелю дещо покращує його каталітичні властивості, проте конверсія етилолеату становить лише 11,6 % (табл. 2). Водночас, обробка такого каталізатора розчином лугу, яка покращувала його активність в реакціях трансестерифікації тригліцеридів [15], навіть дещо зменшує конверсію етилолеату до 10,5 %. У присутності каталізатора аніоніту АВ-17-8 конверсія становить всього 6,3 %.

Оксалат нікелю виявляє найвищу активність як каталізатор реакції між етилолеатом та три- і діетаноламінами. У його присутності конверсія естеру становить 21,9 %. Такий ефект можна пояснити зменшенням електронної густини на катіоні Ni^{2+} внаслідок високих електроноакцепторних властивостей оксалат-аніону. Водночас іон Sn^{2+} , який є ефективним каталізатором процесу естерифікації та трансестерифікації, в поєднанні з *n*-толуенсульфонат-аніоном виявляє активність на рівні катіоніту КУ-2-8 та аніоніту АВ-17-8.

Загалом досліджені гетерогенні каталізатори, окрім оксалату нікелю, виявляють нижчу активність порівняно з гомогенним каталізатором гідроксидом калію, який забезпечує конверсію естеру 19,2 % за співвідношення ЕО : ЕА – 1,5 : 1 (табл. 2).

Висновок

Отже, отримані результати дають змогу зробити висновок про потенційну перспективність застосування катіоніту КУ-2-8 у Н-формі та оксалату нікелю як каталізаторів реакції між етилолеатом і три- та діетаноламінами.

Список літератури

- Dinesh K., Amjad A. Direct synthesis of fatty acid alkanolamides and fatty acid alkyl esters from high free fatty acid containing triglycerides as lubricity improvers using heterogeneous catalyst. *Fuel*. 2015. № 159. P. 845-853. doi: 10.1016/j.fuel.2015.07.046.
- Wang X., Wang T., Wang X. An Improved Method for Synthesis of N-stearoyl and N-palmitoylethanolamine. *J. Am. Oil. Chem. Soc.* 2012. № 89. P. 1305-1313. doi: 10.1007/s11746w-012-2017-y.

- Chintareddy V. R., Ho H., Sadow A. D., Verkade J. G. Polymer-mounted $N_3=P(MeNCH_2CH_2)_3N$: a green, efficient and recyclable catalyst for room-temperature transesterifications and amidations of unactivated esters. *Tetrahedron Lett.* 2011. № 52. P. 6523–6529 doi: 10.1016/j.tetlet.2011.09.102.
- Freedman B., Butterfield R. O., Pryde E. H. Transesterification Kinetics of Soybean Oil. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 1986. № 63. P. 1375. doi: 10.1007/BF02679606.
- Ohshima Y., Imoto H., Fujii A. Process for the production of high purity alkanolamide (Verfahren zur Herstellung von hochreinem Alkanolamid). Patent German No DE19648513. 1997.
- Wang X., Chen Y., Jin Q., Huang J., Wang X. Synthesis of Linoleoyl Ethanolamide. *J. Oleo Sci.* 2013. № 62(6). P. 427-433. doi: 10.5650/jos.62.427.
- Tkacheva A., Dosmagambetova I., Chapellier Y. Pharmaceuticals and Surfactants from Alga-Derived Feedstock: Amidation of Fatty Acids and Their Derivatives with Amino Alcohols. *ChemSusChem*. 2015. № 8(16). P. 2670–2680. doi: 10.1002/cssc.201500526.
- Mäki-Arvela P., Zhu J., Kumar N., Eränen K., Aho A., Linden J., Salonen J., Peurla M., Mazur A., Matveev V., Murzin D. Yu., Solvent-free “green” amidation of stearic acid for synthesis of biologically active alkylamides over iron supported heterogeneous catalysts. *Appl. Cat. A, General*. 2017. № 542. P. 350-358. doi: 10.1016/j.apcata.2017.06.006.
- Patil P., Pratap A. Choline Chloride Catalyzed Amidation of Fatty Acid Ester to Monoethanolamide: A Green Approach. *J. Oleo Sci.* 2016. № 65(1). P. 75-79. doi: 10.5650/jos.ess15070.
- Wang X., Chen Y., Ma Y., Jin Q., Wang X. Lipozyme 435-catalyzed synthesis of eicosapentaenoyl ethanolamide in a solvent-free system. *J. Molec. Cat. B: Enzym.* 2015. № 122. P. 233-239. doi: 10.1016/j.molcatb.2015.09.016.
- Xiaodong L., Wei L., Qing P., Haiyan L., Tao C., Sailong X., Fazhi Z. Activated MgAl-layered double hydroxide as solid base catalysts for the conversion of fatty acid methyl esters to monoethanolamides. *Appl. Cat. A: General*. 2011. № 399. P. 87–92. doi: 10.1016/j.apcata.2011.03.042.
- Ramesh P., Fadnavis N. W. Ammonium Nitrate: A Biodegradable and Efficient Catalyst for the Direct Amidation of Esters under Solvent-free Conditions. *Chem. Lett.* 2015. № 44. P. 138–140. doi: 10.1246/cl.140846.
- Fearheller S. H., Bistline Jr. R. G., Bilyk A., Dudley R. L., Kozempel M. F., Haas M. J. A Novel Technique for the Preparation of Secondary Fatty Amides. III. Alkanolamides, Diamides and Aralkylamides. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 1994. № 71(8). P. 863-866.
- Melnyk Yu., Melnyk S., Palyukh Z., Dzinyak B. Research into transesterification of triglycerides by aliphatic alcohols C2–C4 in the presence of ionites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. №1/6(94). P. 10–16. doi: 10.15587/1729-4061.2018.122938.
- Мельник Ю. П., Мельник С. П., Магорівська Г. Я. Трансестерифікація тригліцеридів рослинних олій головною фракцією етилового спирту. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. 2021. № 1(7). С. 72–79. doi: 10.20998/2413-4295.2021.01.11.
- Данилюк Р. В., Комарецька А. А., Мельник Ю. П., Мельник С. П. Закономірності взаємодії естерів аліфатичних карбонових кислот і етаноламінів. *Наукові вісті Далівського університету*. 2021. № 21. doi: 10.33216/2222-3428-2021-21-8.

References (transliterated)

1. Dinesh K., Amjad A. Direct synthesis of fatty acid alkanolamides and fatty acid alkyl esters from high free fatty acid containing triglycerides as lubricity improvers using heterogeneous catalyst. *Fuel*, 2015, Vol. 159, pp. 845-853, doi: 10.1016/j.fuel.2015.07.046.
2. Wang X., Wang T., Wang X. An Improved Method for Synthesis of N-stearoyl and N-palmitoylethanolamine. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 2012, Vol. 89, pp. 1305-1313, doi: 10.1007/s11746-012-2017-y.
3. Chintareddy V. R., Ho H., Sadow A. D., Verkade J. G. Polymer-mounted $N_3=P(MeNCH_2CH_2)_3N$: a green, efficient and recyclable catalyst for room-temperature transesterifications and amidations of unactivated esters. *Tetrahedron Lett.*, 2011, Vol. 52, pp. 6523–6529, doi: 10.1016/j.tetlet.2011.09.102.
4. Freedman B., Butterfield R. O., Pryde E. H. Transesterification Kinetics of Soybean Oil. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 1986, Vol. 63, pp. 1375, doi: 10.1007/BF02679606.
5. Ohshima Y., Imoto H., Fujiu A. Process for the production of high purity alkanolamide (Verfahren zur Herstellung von hochreinem Alkanolamid). Patent German No DE19648513. 1997.
6. Wang X., Chen Y., Jin Q., Huang J., Wang X. Synthesis of Linoleoyl Ethanolamide. *J. Oleo Sci.*, 2013, Vol. 62, no. 6, pp. 427-433, doi: 10.5650/jos.62.427.
7. Tkacheva A., Dosmagambetova I., Chapellier Y. Pharmaceuticals and Surfactants from Alga-Derived Feedstock: Amidation of Fatty Acids and Their Derivatives with Amino Alcohols. *ChemSusChem.*, 2015, Vol. 8, no. 16, pp. 2670–2680, doi: 10.1002/cssc.201500526.
8. Mäki-Arvela P., Zhu J., Kumar N., Eränen K., Aho A., Linden J., Salonen J., Peurla M., Mazur A., Matveev V., Murzin D. Yu., Solvent-free “green” amidation of stearic acid for synthesis of biologically active alkylamides over iron supported heterogeneous catalysts. *Appl. Catal. A, General*, 2017, Vol. 542, pp. 350-358, doi: 10.1016/j.apcata.2017.06.006.
9. Patil P., Pratap A. Choline Chloride Catalyzed Amidation of Fatty Acid Ester to Monoethanolamide: A Green Approach. *J. Oleo Sci.*, 2016, Vol. 65, no. 1, pp. 75-79, doi: 10.5650/jos.ess15070.
10. Wang X., Chen Y., Ma Y., Jin Q., Wang X. Lipozyme 435-catalyzed synthesis of eicosapentaenoyl ethanolamide in a solvent-free system. *J. Molec. Cat. B: Enzym*, 2015, Vol. 122, pp. 233-239 doi: 10.1016/j.molcatb.2015.09.016.
11. Xiaodong L., Wei L., Qing P., Haiyan L., Tao C., Sailong X., Fazhi Z. Activated MgAl-layered double hydroxide as solid base catalysts for the conversion of fatty acid methyl esters to monoethanolamides. *Appl. Catal. A: General*, 2011, Vol. 399, pp. 87–92, doi: 10.1016/j.apcata.2011.03.042.
12. Ramesh P., Fadnavis N. W. Ammonium Nitrate: A Biodegradable and Efficient Catalyst for the Direct Amidation of Esters under Solvent-free Conditions. *Chem. Lett.*, 2015, Vol. 44, pp. 138–140, doi: 10.1246/cl.140846.
13. Fearheller S. H., Bistline Jr. R. G., Bilyk A., Dudley R. L., Kozempel M. F., Haas M. J. A Novel Technique for the Preparation of Secondary Fatty Amides. III. Alkanolamides, Diamides and Aralkylamides. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 1994, Vol. 71, no. 8, pp. 863-866.
14. Melnyk Yu., Melnyk S., Palyukh Z., Dzinyak B. Research into transesterification of triglycerides by aliphatic alcohols C2–C4 in the presence of ionites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, Vol. 1/6, no 94, pp. 10–16, doi: 10.15587/1729-4061.2018.122938.
15. Melnyk Yu., Melnyk S., Mahorivska H. Transesterification of vegetable oils' triglycerides with the head fraction of ethyl alcohol. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7), pp. 72-79, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.11.
16. Danyliuk R. V., Komaretska A. A., Melnyk Yu. R., Melnyk S. R. Zakonomirnosti vzaiemodii esteriv alifatychnykh karbonovykh kyslot i etanolaminiv. *Naukovi visti Dalivskoho universytetu*, 2021, Vol. 21, doi: 10.33216/2222-3428-2021-21-8.

Відомості про авторів (About authors)

Данилюк Роман Володимирович – аспірант, Національний університет «Львівська політехніка», аспірант кафедри технології органічних продуктів; тел.: (068) 241-71-79; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7222-6602>, e-mail: roman.v.danyliuk@lpnu.ua.

Danyliuk Roman – PhD Student, Lviv Polytechnic National University, PhD Student at the Department of Organic Products Technology; tel:(068) 241-71-79; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7222-6602>, e-mail: roman.v.danyliuk@lpnu.ua.

Мельник Степан Романович – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри технології органічних продуктів; тел.: (067) 391-29-77; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0629-9723>, e-mail: stepan.r.melnyk@lpnu.ua.

Melnyk Stepan – Doctor of Technical Sciences, Professor, Lviv Polytechnic National University, Professor at the Department of Organic Products Technology; tel.: (067) 391-29-77; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0629-9723>, e-mail: stepan.r.melnyk@lpnu.ua.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Данилюк Р. В., Мельник С. Р. Вплив каталізаторів на реакції між три- і діетаноламінами та етилолеатом. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 65-69. doi:10.20998/2413-4295.2022.04.10.

Please cite this article as:

Danyliuk R., Melnyk S. The catalysts impact on the tri- and diethanolamine and ethyl oleate interaction. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4(14), pp. 65–69, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.10.

Надійшла (received) 29.11.2022

УДК 54.544.651/653

doi:10.20998/2413-4295.2022.04.11

ВПЛИВ МАТЕРІАЛУ КАТОДУ НА СУМІЩЕНІ КАТОДНІ ПРОЦЕСИ У ВОДНИХ РОЗЧИНАХ ЗАЛІЗА (II) СУЛЬФАТУ

К. М. КРАВЧЕНКО*, Г. Г. ТУЛЬСЬКИЙ

кафедра технічної електрохімії НТУ «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: k.n.kravchenko92@gmail.com

АНОТАЦІЯ Розглянуто вплив матеріалу катоду на суміщені катодні процеси у водних розчинах сульфатної кислоти. Підтверджено, що розроблена методика електрохімічної регенерації відпрацьованих розчинів сульфатно-кислотної обробки сталевих виробів вирішує проблему із утилізацією таких відпрацьованих сульфатних розчинів із включенням сульфатів заліза. Акцентовано увагу, що існуючі методи не є ефективними, зокрема, відпрацьовані сульфатні розчини нейтралізують лугом або відходами других виробництв, що містять тверді карбонати та гідроксиди. При цьому утворюються сульфатні відходи, що потребують захоронення на спеціальних полігонах. Під час проведення дослідів підтверджено, що застосування електрохімічної регенерації дає змогу катодно осадити залізо у вигляді фольги або металевий порошок, а через перебіг анодного процесу – перевести сульфати у сульфатну кислоту. Було встановлено кінетична закономірність суміщених катодних процесів у модельних розчинах заліза (II) сульфату з сульфатною кислотою. У якості матеріалу катоду використовували платину та мідь. Вибір матеріалу катоду ґрунтувався на різних електрохімічних властивостях цих обраних металів по відношенню до водневої реакції. За результатами проведених вольтамперних досліджень було обґрунтовано катодну густину струму у діапазоні 0,02...0,04 А·см⁻² для регенерації модельного водного розчину (моль·дм⁻³): 0,5 заліза (II) сульфату та 0,5 сульфатної кислоти для діапазону температур 290...293 К. Балансове дослідження з регенерації модельного розчину (моль·дм⁻³): 0,5 заліза (II) сульфату та 0,5 сульфатної кислоти проведено у трикамерному електролізері. Вихідний досліджуваній розчин подавався у середню камеру. Катодна густина струму складала 0,025 і 0,035 А·см⁻², робоча площа анода і катода – 85 см². На катоді з 08X12N10T одержали компактний осад заліза, який відшарувався. Аналіз катодного осаду показав наявність в залізі 0,065 % водню. Вихід за струмом заліза склав 92 %. Закінчення тафелівської ділянки перебігу катодного відновлення заліза з електрохімічним контролем відбувався через концентраційні обмеження по Fe²⁺ та омичний опір адсорбованого водню на межі гетерогенних фаз. Запропоновано усунути ці обмеження за рахунок перемішування електроліту.

Ключові слова: сульфатна кислота; кінетика; платина; мідь; металевий порошок; залізо

INFLUENCE OF CATHODE MATERIAL ON COMBINED CATHODE PROCESSES IN AQUEOUS SOLUTIONS OF IRON(II) SULPHATE

K. KRAVCHENKO, G. TULSKY

Department of Technical Electrochemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Sulfuric acid is present in many enterprises for metal processing and manufacturing of metal parts. Existing methods of regeneration of spent solutions are not effective, in particular, spent sulfate solutions are neutralized with lye or waste from other industries containing solid carbonates and hydroxides. At the same time, sulfate waste is formed, which requires disposal at special landfills. Electrochemical regeneration of spent solutions of sulfate-acid treatment of steel solves the problem of disposal of such spent sulfate solutions with the inclusion of iron sulfates. The kinetics of combined cathodic processes in aqueous solutions of iron (II) sulfate at a concentration of 0.5 mol·dm⁻³ of iron (II) sulfate, depending on the cathode material was studied. The research methodology was as follows: model aqueous solutions with a composition (mol·dm⁻³): 0.5 iron (II) sulfate with the addition of 0.5 sulfuric acid and a control solution – 1.0 sulfuric acid were prepared from chemicals of high stage of purification by dissolution in distilled water. The study of the kinetics of combined cathodic processes in model aqueous solutions was carried out by the method of linear voltammetry using the MTEch PGP-500 S potentiostat. The auxiliary electrode is platinum. The reference electrode is mercury sulfate. Determination of iron (II) ions in the solution was carried out by the permanganometric method. Based on the analysis of the obtained current-voltage curves, the effectiveness of the application of electrochemical regeneration of model solutions of iron (II) sulfate with sulfuric acid was established, which makes it possible to cathodically deposit iron in the form of foil or metal powder, and through the course of the anodic process - convert sulfates into sulfuric acid. During this process, oxidation of Fe²⁺ to Fe³⁺ takes place at the slightly soluble anode. Therefore, it is proposed to use polymer porous diaphragms to prevent Fe²⁺ from entering the anode space. Platinum and copper were used as cathode material. The choice of cathode material was based on different electrochemical properties of these metals in relation to the hydrogen reaction. The balance research on the regeneration of the model solution was carried out in a three-chamber electrolyzer. The initial test solution was fed into the middle chamber. The cathodic current density was 0.025 and 0.035 A·cm⁻², the working area of the anode and cathode was 85 cm². A compact iron deposit was obtained on the cathode with 08X12N10T, which peeled off. The analysis of the cathode deposit showed the presence of 0.065% hydrogen in iron. Output according to the current of iron was 92%. The end of the Tafel section of the course of cathodic reduction of iron with electrochemical control occurs due to Fe²⁺ concentration limitations and the ohmic resistance of adsorbed hydrogen at the boundary of heterogeneous phases. It is proposed to eliminate these limitations due to electrolyte mixing.

Keywords: sulfate acid; kinetics; platinum; copper; metal powder; iron

Вступ

Сульфатна кислота використовується на багатьох підприємствах, пов'язаних з обробкою

металів та виготовленням металевих деталей. Серед таких підприємств металургійні, металообробні, хімічні, гальванічні та навіть меблеві підприємства.

Після технологічних операцій з підготовки поверхні сталевих деталей утворюється багато відходів у вигляді відпрацьованих сульфатних розчинів різної концентрації, сульфатних електролітів із домішками сульфату заліза. Повторне застосування таких відпрацьованих розчинів на підприємствах, де вони використовуються не є можливим [1,2] через відсутність методів регенерації та їх відновлення. У більшості випадку відпрацьовані сульфатні розчини нейтралізують лугом або відходами інших виробництв, що містять тверді карбонати та гідроксиди. При цьому утворюються сульфатні відходи, що потребують захоронення на спеціальних полігонах.

Сучасний стан, кількість відпрацьованих сульфатних розчинів із включенням сульфатів заліза та відсутність методів їх регенерації стало рушійною силою для вирішення цієї промислової і екологічної задачі.

Мета роботи

Дослідження кінетики суміщених катодних процесів у водних розчинах заліза (II) сульфату при концентрації 0,5 моль·дм⁻³ заліза (II) сульфату в залежності від матеріалу катоду. Одержані результати будуть використані для обґрунтування можливості застосування електрохімічного методу регенерації розчинів сульфатно-кислотної обробки сталі та визначення технологічних параметрів регенерації відпрацьованих розчинів травлення заліза.

Виклад основного матеріалу

Розроблення методики електрохімічної регенерації відпрацьованих розчинів сульфатно-кислотної обробки сталевих виробів вирішує проблему із утилізацією таких відпрацьованих сульфатних розчинів із включенням сульфатів заліза. Застосування електрохімічної регенерації дає змогу катодно осадити залізо у вигляді фольги або металевого порошку, а через перебіг анодного процесу – перевести сульфати у сульфатну кислоту, що дозволяє перешкодити утворенню відходів та дає змогу не тільки покращити екологічні показники регіону, а й перейти на замкнутий цикл по використанню сульфатної кислоти. Попередній досвід вказує на економічну доцільність електрохімічних методів регенерації відпрацьованих технологічних розчинів [3].

Проблемою регенерації відпрацьованих розчинів заліза (II) сульфату є можливість окислення Fe²⁺ до Fe³⁺ на малорозчинному аноді. Тому потребує дослідження можливість застосування полімерних поруватих діафрагм для перешкоджання потрапляння Fe²⁺ до анодного простору.

Робочі розчини готували розчиненням хімікатів кваліфікації «х.ч.» у дистильованій воді. Дослідження кінетики суміщених катодних процесів у модельних

водних розчинах заліза (II) сульфату з сульфатною кислотою проводили методом лінійної вольтамперометрії з використанням потенціостату МТех PGP–500 S. Допоміжний електрод – платина. Електрод порівняння – ртутносульфатний.

Модельні водні розчини мають наступний склад (моль·дм⁻³): 0,5 заліза (II) сульфату із додаванням 0,5 сульфатної кислоти та контрольний розчин – 1,0 сульфатної кислоти. Вольтамперні залежності виділення водню використовувались для аналізу перебігу суміщених процесів у модельних водних розчинах заліза (II) сульфату.

Визначення іонів заліза (II) у розчині проводилось перманганатометричним методом.

У ході аналізу взяли пробу 3,0 мл сульфокислого розчину іону заліза (II), додали 10 мл H₂SO₄ (1:4), розбавили до 200 мл та титрували 0,1 н. розчином перманганату калія на холоді, до появи стійкого помаранчевого окрасу [4].

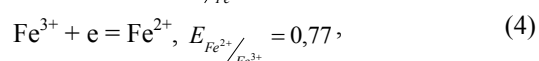
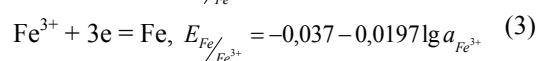
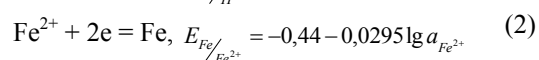
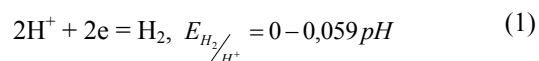
Взяті проби порівнювалися із модельним розчином відомої концентрації, для визначення вмісту та концентрації іонів Fe²⁺ у розчинах. Контрольний модельний розчин має концентрацію 366 г/л FeSO₄ та H₂SO₄ 25 г/л відповідно.

Регенерація розчинів сульфатно-кислотної обробки сталі електрохімічним методом проводиться у трьохкамерному електролізері [3]. Вихідний модельний розчин заліза (II) сульфату подавався у середню камеру. У якості діафрагм використовували міпор ПН.

Обговорення результатів

У водних розчинах сульфатної кислоти залізо існує у вигляді Fe²⁺ та Fe³⁺ [5]. При взаємодії залізних деталей з розчинами сульфатної кислоти при хімічному травленні цих деталей утворюється Fe²⁺. Під час взаємодії Fe²⁺ з киснем повітря відбувається його окиснення до Fe³⁺.

На катоді, з розчинів заліза сульфату, можливий перебіг наступних процесів:



де E – електродний потенціал реакції. З літературних джерел [2,6-8] відомо, що залізо, з кислих розчинів, відновлюється паралельно з утворенням водню. Однак, враховуючи перенапругу суміщених процесів відновлення протонів і Fe²⁺ на залізному катоді, вихід за струмом за процесом (2) може наблизитися до 100 %. Залежності від співвідношення концентрації іонів заліза і катодної

густини струму залізо може катодно осаджуватись у вигляді компактного осаду або порошку. Компактний осад заліза має значне внутрішнє напруження, що призводить до його відшарування та крихкості. Також на властивості осаду заліза впливає концентрація Fe^{2+} в електроліті.

Для дослідження кінетики суміщених катодних процесів використовували модельні розчини заліза (II) сульфату з сульфатною кислотою. У якості матеріалу катоду застосовували платину та мідь. Вибір матеріалу катоду ґрунтувався на різних електрохімічних властивостях цих обраних металів по відношенню до водневої реакції [9–13]. Так, платина характеризується низькою перенапругою виділення водню, а мідь – високою. Вольтамперні катодні залежності у кислих сульфатних розчинах на платиновому та мідному катодах наведено у рис. 1.

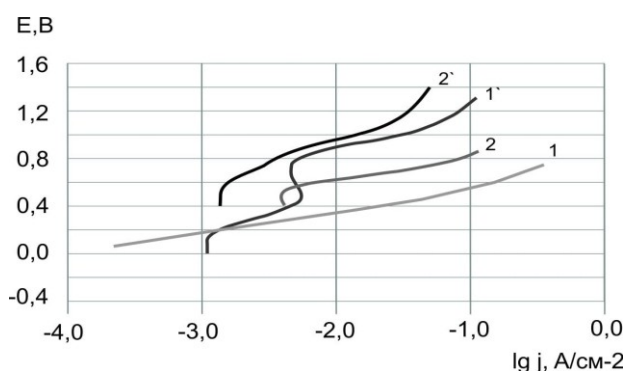


Рис. 1 – Вольтамперні катодні залежності на платиновому (1, 1') та мідному (2, 2') електродах, у розчинах (моль·дм⁻³): 1, 2 – 1,0 H₂SO₄; 1', 2' – 0,5 H₂SO₄ + 0,5 FeSO₄. Швидкість розгортки потенціалу 100 мВ за секунду

Вольтамперна катодна залежність, одержана на платиновому електроді у розчині сульфатної кислоти (рис. 1, залежність 1) відповідає виділенню водню та має широку тафелівську ділянку в діапазоні потенціалів – 0,05...–0,5 В. У розчині сульфатної кислоти та заліза (II) сульфату (рис. 1, залежність 1') залежність має дві тафелівські ділянки. Перша, при потенціалах –0,1...–0,4 В простягається до рівноважного потенціалу рівняння (1) і відповідає виділенню водню. Друга, при потенціалах до –1,0 В – відповідає суміщеному виділенню водню та відновленню заліза. Друга прямолінійна ділянка закінчується підйомом струму через концентраційні обмеження по Fe^{2+} та омичний опір адсорбованого водню на межі гетерогенних фаз. Усунути ці обмеження пропонується за рахунок перемішування електроліту.

Вольтамперна катодна залежність, одержана на мідному електроді у розчині сульфатної кислоти (рис. 1, залежність 2) прогнозовано перебігає при більш негативних потенціалах (≈ 300 мВ) через меншу каталітичну активність міді в електрохімічному виділенні водню у порівнянні з платиною. Дві тафелівські ділянки, у розчині сульфатної кислоти та

заліза (II) сульфату, на мідному катоді менш виражені через високу перенапругу виділення водню (рис. 1, залежність 2'). Друга прямолінійна ділянка, як і на платиновому катоді, закінчується підйомом струму через концентраційні обмеження по Fe^{2+} та омичний опір. Одержані вольтамперні залежності на катодних матеріалах різної природи були використані для обґрунтування робочих густин струму вилучення заліза з відпрацьованих травильних розчинів в дослідному електролізері.

За результатами проведених вольтамперних досліджень було обґрунтовано катодну густину струму у діапазоні 0,02...0,04 А·см⁻² для регенерації модельного водного розчину (моль·дм⁻³): 0,5 заліза (II) сульфату та 0,5 сульфатної кислоти для діапазону температур 290...293 К.

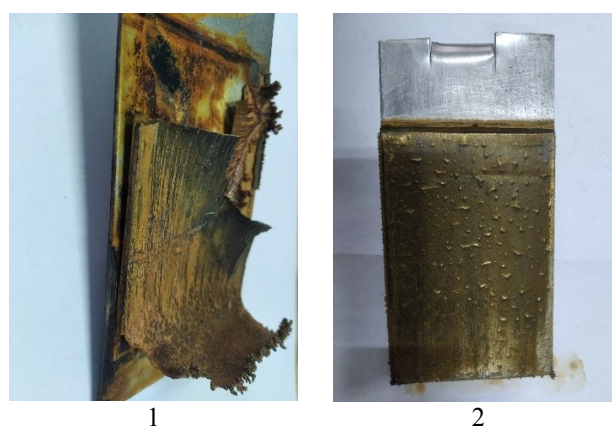


Рис. 2 – Фотографії компактного осаду заліза на катоді з 08X12H10T в залежності від густини струму (А/м²): 1 – 250; 2 – 350

Балансове дослідження з регенерації модельного водного розчину (моль·дм⁻³): 0,5 заліза (II) сульфату та 0,5 сульфатної кислоти проводили у трикамерному електролізері [3,12-14]. Вихідний досліджуваний розчин подавали у середню камеру. Катодна густина струму складала 0,025 і 0,035 А·см⁻², робоча площа анода і катода – 85 см². На катоді з 08X12H10T одержали компактний осад заліза, який відшарувався (рис.2). Аналіз катодного осаду показав наявність в залізі 0,065% водню. Вихід за струмом заліза склав 92%.

Вплив тривалості електролізу на зміну концентрації Fe^{2+} та H₂SO₄ по камерах лабораторного електролізера наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Зміна концентрації компонентів електролітів в залежності від часу електролізу

		Час електролізу, год			
		0,0	0,5	1,0	2,0
$C_{Fe^{2+}}$	Анодна камера	220	249	195	126
	Середня камера	220	356	339	310
	Катодна камера	220	258	193	115
$C_{H_2SO_4}$	Анодна камера	25	30	34,3	39

Наведені у табл. 1 результати вказують на ефективність застосування трикамерного електролізера для регенерації відпрацьованих травильних розчинів із застосуванням у якості діафрагм міпору ПН.

Висновки

За результатами дослідження кінетики сумішених катодних процесів у водних розчинах заліза (II) сульфату були визначені діапазони потенціалів і густини струму, які відповідають електрохімічному виділенню заліза, сумішеному з виділенням водню. Вихід за струмом виділення заліза склав 92 %.

Закінчення тафелевської ділянки перебігу катодного відновлення заліза з електрохімічним контролем відбувається через концентраційні обмеження по Fe^{2+} та омичний опір адсорбованого водню на межі гетерогенних фаз.

Проведені балансові дослідження з регенерації модельного відпрацьованого розчину (моль·дм⁻³): 0,5 заліза (II) сульфату 0,5 сульфатної кислоти у трикамерному електролізері вказали на ефективність застосування трикамерного електролізера із застосуванням у якості діафрагм міпору ПН.

На катоді з 08X12H10T одержали компактний осад заліза, який відшарувався. Аналіз катодного осаду показав наявність в залізі 0,065 % водню. Вихід за струмом осадження заліза склав 92 %.

Список літератури

1. Смірнова О. Л., Лещенко С. А. *Ресурсозберігаючі електрохімічні виробництва : навчальний посібник*. Харків: Видавництво Іванченка І.С., 2019. 120 с.
2. Кравченко К. М., Тульський Г. Г., Школьнікова Т. В. Обґрунтування технологічних показників електродних процесів у розчинах сульфатної кислоти. *Електрохімія сьогодення: здобутки, проблеми та перспективи: колективна монографія*. Київ: МПБП «Гордон», 2021. С. 191. doi: 10.33609/978-966-8398-64-3.01.2021.1-191.
3. Кравченко К. М., Тульський Г. Г. Електрохімічна регенерація відпрацьованого сульфатного розчину травлення сталі. *Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої 80-річчю кафедри хімії ХНУМГ ім. О. М. Бекетова (Харків, 7–8 лист. 2019 р.)*. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. С. 160.
4. Циганок Л. П., Бубель Т. О., Вишнікін А. Б., Пашкевич О. Ю. *Аналітична хімія. Методи аналізу: навчальний посібник*. Дніпропетровськ: ДНУ ім. О. Гончара, 2014. 252 с.
5. Poubaix M. *Atlas D'Équilibres Electrochimiques*. Paris. Gauthier – Villars & Cie. Éditeur-Imprimeur-Libraire, 1963. 646 p.
6. Jianzhao Tang, Yuwen Pei. The Recycling of Ferric Salt in Steel Pickling Liquors: Preparation of Nano-sized Iron Oxide. *Procedia Environmental Sciences*. 2016. Vol. 31. P. 778–784. doi: 10.1016/j.proenv.2016.02.071.
7. Xiaomeng Wang, Dan Wang. Modified chemical mineralization-alkali neutralization technology:

- Mineralization behavior at high iron concentrations and its application in sulfur acid spent pickling solution. *Water Research*. 2022. Vol. 218. P. 118513. doi: 10.1016/j.watres.2022.118513.
8. Reier T., Nong H. N., Teschner D. Electrocatalytic Oxygen Evolution Reaction in Acidic Environments – Reaction Mechanisms and Catalysts. *Advanced Energy*. 2017. Vol. 7. P. 18. doi: 10.1002/aenm.201601275.
 9. Кравченко К. М., Тульський Г. Г. Титан-діоксидмарганцевий анод для регенерації сульфатно-кислотних розчинів травлення сталі. *Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. присвяченої 100-річчю ХНУМГ ім. О. М. Бекетова (Харків, 7 червня 2022 р.)*. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. С. 109.
 10. Диаб Х. М. и др. Выбор электродных материалов для электрохимической стабилизации воды. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. 2017. №. 49. С. 34–38.
 11. Кравченко К. М., Тульський Г. Г. Електрохімічний метод вилучення заліза з відпрацьованих водних розчинів сульфо-кислотного травлення сталі. *Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій. матеріали міжнар. наук.-практ. конф. присвяченої 100-річчю ХНУМГ ім. О. М. Бекетова (Харків, 7 червня 2022 р.)*. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. С. 108.
 12. Кравченко К. М., Тульський Г. Г. Обґрунтування вибору матеріалів аноду для регенерації сульфатно-кислотних розчинів. *І Інтернет-конференція молодих вчених «Перспективи хімії в сучасному світі» (24 листопада 2021 року). Матеріали конференції*. Житомир: Видавництво ЖДУ ім. І. Франка, 2021. С. 57–59.
 13. Kravchenko K., Pavlov B., Tulsy G. Combined anode processes in sulfuric acid solutions. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2020. no. 4 (6). P. 99-106. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.15.
 14. Dan Chen, Jun Hou, Li-hua Yao, Hong-ming Jin, Guang-Ren Qian, Zhi Ping Xu, Ferrite materials prepared from two industrial wastes: Electroplating sludge and spent pickle liquor. *Separation and Purification Technology*. 2010. Vol. 75, Iss. 2. P. 210-217. doi: 10.1016/j.seppur.2010.07.009.

References (transliterated)

1. Smirnova O. L., Leshchenko S. A. *Resource-saving electrochemical production: a textbook*. Kharkiv. Publishing Ivanchenko I. S., 2019. 120 p.
2. Kravchenko K. M., Tulsy G. G., Shkolnikova T. V. Substantiation of technological indicators of electrode processes in sulfuric acid solutions. *Electrochemistry of the present: achievements, problems and prospects: a collective monograph*. Kyiv: MPBP "Gordon", 2021, pp. 191, doi: 10.33609/978-966-8398-64-3.01.2021.1-191.
3. Kravchenko K. M., Tulsy G. G. Electrochemical regeneration of the used sulfate solution of etching steel. *Current issues of chemistry and integrated technologies: materials of the international science and practice conf. dedicated to the 80th anniversary of the Department of Chemistry of XNUMG named after O. M. Beketova, Kharkiv, (November 7–8, 2019)*. Kharkiv. XNUMG named after O. M. Beketova, 2019, p. 160.
4. Tsyganok L. P., Bubel T. O., Vyshnikin A. B., Vashkevich O. Y. *Analytical chemistry. Methods of analysis: study*

- guide. Dnipropetrovsk. DNU named after O. Honchara, 2014, 252 p.
- Poubaix M. *Atlas D'Équilibres Electrochimiques*. Paris. Gauthier – Villars & Cie. Éditeur-Imprimeur-Libraire, 1963, 646 p.
 - Jianzhao Tang, Yuwen Pei. The Recycling of Ferric Salt in Steel Pickling Liquors: Preparation of Nano-sized Iron Oxide. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, Vol. 31, pp. 778-784, doi: 10.1016/j.proenv.2016.02.071.
 - Xiaomeng Wang, Dan Wang. Modified chemical mineralization-alkali neutralization technology: Mineralization behavior at high iron concentrations and its application in sulfur acid spent pickling solution. *Water Research*, 2022, Vol. 218, pp. 118513, doi: 10.1016/j.watres.2022.118513.
 - Reier T., Nong H. N., Teschner D. Electrocatalytic Oxygen Evolution Reaction in Acidic Environments – Reaction Mechanisms and Catalysts. *Advanced Energy*, 2017, Vol. 7, p. 18, doi: 10.1002/aenm.201601275.
 - Kravchenko K. M., Tulsy G. G. Titanium-manganese dioxide anode for regeneration of sulfate-acid solutions of steel pickling. *Current issues of chemistry and integrated technologies: materials of the international science and practice conf. dedicated to the 100th anniversary of XNUMX named after O. M. Beketova (Kharkiv, June 7, 2022)*. Kharkiv. XNUMX named after O. M. Beketova, 2022, p. 109.
 - Diab Kh. M. [et al.]. Selection of electrode materials for electrochemical stabilization of water. *Bulletin of the KhPI National Technical University. Series: Chemistry, chemical technology and ecology*, 2017, no. 49, pp. 34–38.
 - Kravchenko K. M., Tulsy G. G. Electrochemical method of iron extraction from spent aqueous solutions of sulfo-acid etching of steel. *Current issues of chemistry and integrated technologies. materials of the international science and practice conf. dedicated to the 100th anniversary of XNUMX named after O. M. Beketova (Kharkiv, June 7, 2022)*. Kharkiv. XNUMX named after O. M. Beketova, 2022, p. 108.
 - Kravchenko K. M., Tulsy G. G. Justification of the choice of anode materials for regeneration of sulphatic acid solutions. *I Internet conference of young scientists "Prospects of chemistry in the modern world" (November 24, 2021). Conference materials*. Zhytomyr. ZhSU Publishing House I. Franko, 2021, pp. 57–59.
 - Kravchenko K., Pavlov B., Tulsy G. G. Combined anode processes in sulfuric acid solutions. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 99–106, doi: 10.20998/2413-4295.2020.04.15.
 - Dan Chen, Jun Hou, Li-hua Yao, Hong-ming Jin, Guang-Ren Qian, Zhi Ping Xu, Ferrite materials prepared from two industrial wastes: Electroplating sludge and spent pickle liquor. *Separation and Purification Technology*, 2010, Vol. 75, Iss. 2, pp. 210–217, doi: 10.1016/j.seppur.2010.07.009.

Відомості про авторів (About authors)

Кравченко Кристина Миколаївна – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра технічної електрохімії; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-9412-1393; e-mail: k.n.kravchenko92@gmail.com.

Kravchenko Kristina – postgraduate student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Department of Technical Electrochemistry; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9412-1393; e-mail: k.n.kravchenko92@gmail.com.

Тульський Геннадій Георгійович – доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедрою, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра Технічної електрохімії; м. Харків, Україна; ORCID 0000-0003-2662-8333; e-mail: tgg@kpi.kharkov.ua

Tulsky Gennady – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Department of Technical Electrochemistry; Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0003-2662-8333; e-mail: tgg@kpi.kharkov.ua

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Кравченко К. М., Тульський Г. Г. Вплив матеріалу катоду на суміщенні катодні процеси у водних розчинах заліза (II) сульфату. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 70-74. doi:10.20998/2413-4295.2022.04.11.

Please cite this article as:

Kravchenko K., Tulsy G. Effect of cathode material on combined cathodic processes in aqueous solutions of iron (II) sulfate. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4(14), pp. 70–74, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.11.

Надійшла (received) 08.10.2022

УДК 621.316.99

doi:10.20998/2413-4295.2022.04.12

ВИБІР СПОСОБУ ОБЛАШТУВАННЯ МІСЦЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОПУСТИМОГО ЗНАЧЕННЯ НАПРУГИ ДОТИКУ

Д. Г. КОЛУШКО, С. С. РУДЕНКО*, О. Є. ІСТОМІН

НДПІКІ «Молнія», НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: nio5_molniya@ukr.net

АНОТАЦІЯ Забезпечення допустимого значення напруги дотику в діючих електроустановках є необхідною умовою для електричної безпеки персоналу та сторонніх осіб. На основі літературних даних проаналізовано, у яких випадках досягти допустимих значень напруги дотику лише за допомогою конструкції заземлювального пристрою неможливо. Показано, що забезпечення допустимого значення напруги дотику виконується шляхом облаштування спеціальним чином як місця оперативного обслуговування обладнання, так і території відкритого розподільчого пристрою. Виконано вибір способу облаштування місця обслуговування для забезпечення допустимого значення напруги дотику на обладнанні відкритого розподільчого пристрою при однофазному замиканні на землю. При виконанні роботи були використані статистичні методи аналізу, метод амперметра-вольтметра для експериментального визначення опору основи за методикою НДПІКІ «Молнія» НТУ «ХПІ». Вперше на основі статистичних даних було проаналізовано необхідність облаштування місця оперативного обслуговування обладнання для забезпечення припустимого значення напруги дотику на діючих підстанціях класом 110 (150) кВ та 330 (220) кВ. Експериментальним шляхом визначено розкид значень опору основи. Проаналізовано найпоширеніші способи облаштування місць оперативного обслуговування обладнання: технологічні (природні), а саме: залізобетонний басейн з шаром щебеню, кабельний канал або лоток, асфальтові доріжки та спеціально створені (штучні), а саме: металева конструкція, шар щебеню, залізобетонні плити, бетонні плити без риштунку, тротуарна плитка, бетонні плити (тротуарна плитка) з домішками гравію, полімерпіщані плити. Виконано вимірювання опору основи при використанні перелічених способів на діючих підстанціях. На основі результатів експериментальних вимірювань опору основи на діючих підстанціях визначено переваги і недоліки різних способів облаштування місця обслуговування, та надані рекомендації щодо їх використання.

Ключові слова: підстанція; відкритий розподільчий пристрій; заземлювальний пристрій; напруга дотику; опір основи; питомий опір

SELECTION OF THE TECHNIQUE OF ARRANGEMENT OF EQUIPMENT SERVICE AREA TO PROVIDE THE PERMISSIBLE TOUCH VOLTAGE

D. KOLIUSHKO, S. RUDENKO*, O. ISTOMIN

Research and Design Institute "Molniya", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Ensuring the permissible value of the touch voltage in operating electrical installations is a necessary condition for the electrical safety of personnel and third parties. In the study, based on literature data, it is analyzed in which cases it is impossible to achieve the permissible values of the touch voltage only with the help of the design of the grounding system. It is shown that ensuring the permissible value of the touch voltage is performed by arranging in a special way both the place of operational maintenance of the equipment and the territory of the open door switchgear. It is studied the selection a technique of arrangement of the service place to ensure the permissible value of the touch voltage on the equipment of the open door switchgear during a single-phase short circuit to the ground. When performing the work, statistical methods of analysis, the ammeter-voltmeter method for experimental determination of the resistance of the base according to the method of Research&Design institute "Molniya" NTU "KhPI" were used. For the first time, on the basis of statistical data, the necessity of arrangement of equipment service area to ensure an acceptable value of touch voltage at operating substations of class 110 (150) kV and 330 (220) kV was analyzed. The spread of base resistance (ground resistance of human foot) values was determined experimentally. The most common ways of arrangement of equipment service area were analyzed: technological (natural), namely: a reinforced concrete pool with a layer of crushed stone, a cable channel or tray, asphalt paths and specially created (artificial) ones, namely: a metal structure, a layer of crushed stone, reinforced concrete slabs, concrete slabs without scaffolding, paving slabs, concrete slabs (paving slabs) with gravel admixtures, polymer sand slabs. The base resistance was measured for the listed techniques at operating substations. The advantages and disadvantages of various arrangement of equipment service area are determined, and recommendations for their use are provided.

Keywords: substation; open door switchgear; grounding system; touch voltage; ground resistance of human foot; resistivity

Вступ

У відкритих розподільчих пристроях (ВРП) високовольтних підстанцій напругою 110 кВ і вище для безпеки персоналу та надійної роботи обладнання облаштовується заземлювальний пристрій (ЗП), який представляє собою розгалужену систему з горизонтальних та вертикальних заземлювачів, з'єднаних між собою відповідно до міжнародних та вітчизняних вимог [1-8]. Така система при протіканні струмів однофазного замикання на землю (ОЗЗ)

дозволяє зменшити потенціал на ЗП, вирівняти розподіл потенціалів по поверхні ґрунту, що в свою чергу приводить до зниження напруги дотику.

В Україні та світі основним параметром, що характеризує електробезпеку, є напруга дотику. В загальному випадку, вона визначається, як:

$$U_t = \left| \varphi_e - \varphi_P \right| \frac{R_b}{R_b + R_f}, \quad (1)$$

де φ_e – потенціал на конструкції обладнання, φ_P – потенціал на поверхні землі в місці обслуговування, на

відстані 0,8 м або 1,0 м від обладнання, R_b – опір тіла людини 1000 Ом [8]; R_f – опір основи.

Таким чином, вважається, що коли конструкція ЗП виконана відповідно до вимог [7] різниця потенціалів є відносно невеликою, а напруга дотику не перевищує допустиме значення, яке є функцією часу спрацювання захисту (див. рис. 1).

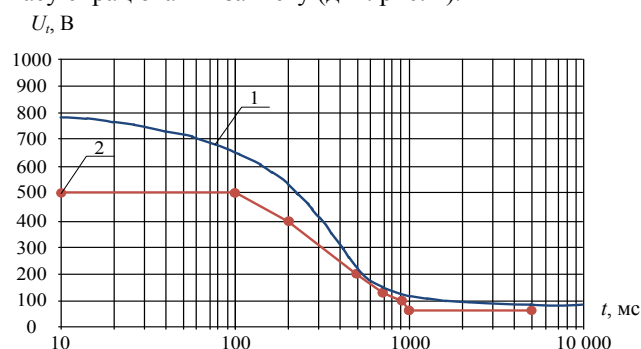


Рис. 1 – Залежність допустимої величини напруги: крива 1 згідно [1]; крива 2 згідно [7]

Проте існують такі випадки, коли досягти допустимих значень напруги дотику лише за допомогою конструкції ЗП неможливо. Це може виникнути внаслідок впливу наступних факторів або їх комбінації:

- велике значення струму ОЗЗ (в Україні може сягати 60 кА) [9];

- тривалий час дії пристроїв захисту. Наприклад, якщо час дії захисту 0,1 с, то U_t буде дорівнювати 500 В, а при часі дії захисту ≥ 1 с – $U_t = 65$ В (див. рис. 1);

- розташування електроустановки з малою діагоналлю ЗП у стислій забудові (при великому значенні струму ОЗЗ виникає значна напруга на ЗП) [9];

- високий питомий опір всіх шарів ґрунту (неефективність встановлення вертикальних заземлювачів з метою зменшення напруги на ЗП) [10] або досить суттєва товщина шару з великим питомим опором (встановлення вертикального заземлювача на потрібну глибину може бути недоцільним);

- співвідношення значень питомих опорів першого та другого шарів ґрунту значно більше одиниці (розподіл еквіпотенціалей є дуже щільним, відповідно й значення напруги дотику буде високим) [9];

- низьке значення опору розтікання струму з ніг людини (опору основи R_f) [11].

У такому випадку національними та міжнародними стандартами передбачено забезпечення допустимого значення напруги дотику шляхом облаштування спеціальним чином як місця оперативного обслуговування обладнання, так і території відкритого розподільчого пристрою. Національні стандарти України вказують, що для зниження напруги дотику може бути виконане підсіпання шару щебеню товщиною від 0,1 м до 0,2 м, що фактично збільшує опір основи, як видно з (1).

Міжнародні та національні стандарти інших країн (Великобританії, США, Бразилії, Швейцарії тощо) передбачають використання різного роду ізолюючих

поверхонь для збільшення опору основи (наприклад, асфальтове покриття) або облаштування спеціальних місць оперативного обслуговування з провідних матеріалів, які гальванічно приєднанні до ЗП (при опорі контактних з'єднань, які мають бути менше 0,1 Ом, різниця потенціалів між площадкою та заземленим обладнанням є близькою до нуля). Проте в жодному з цих стандартів не надано рекомендацій щодо способу облаштування місця обслуговування обладнання та вибору матеріалів. Враховуючи, що різниця між вартістю реалізації різних способів може сягати десятків разів (наприклад, використання бетонних плит або асфальтового покриття), актуальною є задача вибору способу облаштування місця обслуговування високовольтного обладнання електроустановок для забезпечення електробезпеки персоналу.

Мета роботи

Метою роботи є вибір способу облаштування місця обслуговування для забезпечення допустимого значення напруги дотику на обладнанні відкритого розподільчого пристрою при ОЗЗ.

Дослідження пропонується виконати на основі статистичної бази даних, що була накоплена в ході виконання електромагнітної діагностики стану ЗП ВРП електричних станцій та підстанцій класом напруги 110–330 кВ, а також приймально-здавальних випробувань після реконструкції ЗП за рекомендаціями, що були розроблені авторами.

1. Статистичні дані щодо необхідності збільшення опору основи

При проведенні аналізу були використані відомості для підстанцій обленерго класом напруги 110 (150) кВ та НЕК «Укренерго» класом напруги 220 (330) кВ. Слід зауважити, що тут і далі було використано розподіл між електроенергетичними системами та обленерго, який існував до початку війни 2014 р. Також, на підстанціях НЕК «Укренерго» при проведенні аналізу окремо розглядалися ВРП-110 (150) кВ та ВРП-220 (330) кВ. Для підстанцій НЕК «Укренерго» об'єм вибірки склав: Дніпровська електроенергетична система (ЕС) – 20 підстанцій, Донбаська ЕС – 17, Західна ЕС – 11, Кримська ЕС – 4, Північна ЕС – 13, Центральна ЕС – 12, Південна ЕС – 7, Південно-Західна – 1. В табл. 1 наведено статистичні дані для перелічених підстанцій електроенергетичних систем щодо необхідності облаштування додатково ізолюючого шару в місці оперативного обслуговування обладнання.

Загалом було проаналізовано 84 підстанції НЕК «Укренерго» зі 134 і якщо прийняти репрезентативність вибірки, то облаштувати місце оперативного обслуговування обладнання необхідно в середньому на 55 % ВРП-220 (330) кВ та 76 % ВРП-110 (150) кВ. При цьому діапазон необхідного опору основи для забезпечення допустимого значення напруги дотику лежить в діапазоні від 0,9 кОм до 30,0 кОм.

Таблиця 1 – Необхідність облаштування місця обслуговування для підстанцій НЕК «Укренерго»

Назва ЕС	Кількість підстанцій, %:			Діапазон значень необхідного R_f , кОм:			
	проаналізованих від загальної кількості	необхідне збільшення R_f		мінімальне		максимальне	
		ВРП-220 (330) кВ	ВРП-110 (150) кВ	ВРП-220 (330) кВ	ВРП-110 (150) кВ	ВРП-220 (330) кВ	ВРП-110 (150) кВ
Дніпровська ЕС	90,9	80,0	90,0	1,0	1,0	4,5	4,5
Донбаська ЕС	60,7	52,9	82,4	1,5	1,0	4,5	7,5
Західна ЕС	55,0	27,3	63,6	2,0	0,9	5,0	5,0
Кримська ЕС	23,5	0,0	0,0	–	–	–	–
Північна ЕС	92,9	61,5	84,6	1,2	30,0	1,4	30,0
Центральна ЕС	92,3	58,3	75,0	1,5	10,0	1,5	10,0
Південна ЕС	58,3	50,0	83,3	1,7	4,5	1,0	4,5
Південно-Західна ЕС	11,1	0,0	0,0	–	–	–	–

На рис. 2 наведено розподіл частоти R_f для підстанцій НЕК «Укренерго».

Також було обрано низку обленерго, для яких існує можливість досить широко аналізувати географію розташування на території України, та було виконано найбільший відсоток діагностики підстанцій класом напруги 110(150) кВ відносно загальної їх кількості, зокрема це: Дніпрообленерго – 72 підстанції; Донецькобленерго – 86; Житомиробленерго – 11; Сумиобленерго – 37; Харківобленерго – 45, Криворізькобленерго – 51, Кіровоградобленерго – 19.

У табл. 2 наведено статистичні дані для підстанцій перелічених обленерго щодо необхідності облаштування додатково ізолюючого шару в місці оперативного обслуговування обладнання.

Загалом було проаналізовано 321 підстанцію 110(150) кВ обленерго, що складає приблизно 25% від загальної кількості підстанцій України відповідного класу напруги. На рис. 3 наведено розподіл частоти величини R_f для вказаних підстанцій. При цьому діапазон значень опору основи для забезпечення допустимого рівня напруги дотику лежить в інтервалі від 0,7 кОм до 30,0 кОм.

Загалом, якщо прийняти репрезентативність вибірки, то облаштувати місце оперативного обслуговування обладнання необхідно в середньому на 48 % підстанцій.

На рис. 4 наведено розподіл накопиченої частоти F для всіх проаналізованих енергооб'єктів. Як бачимо, опір основи 3 кОм дозволяє забезпечити допустиме значення напруги дотику для 50 % підстанцій класом напруги 110 (150) кВ, а опір 12,5 кОм – для 95 %. При цьому, для підстанцій НЕК "Укренерго" 330 (220) кВ є характерним зміщення значень R_f в діапазон [1,0; 6,0] кОм, який фактично охоплює 95 % об'єктів, а опір основи 2,5 кОм дозволяє забезпечити допустиме значення напруги дотику для 50 % підстанцій.

2. Аналіз існуючих способів підвищення опору основи

Для визначення найбільш ефективного способу підвищення опору основи необхідно проаналізувати технічні рішення, які застосовуються на діючих підстанціях.

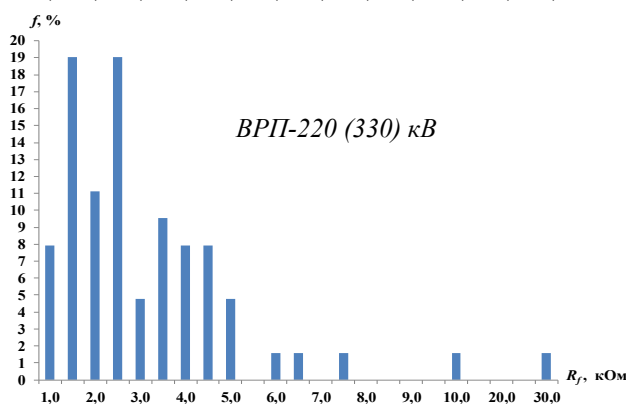
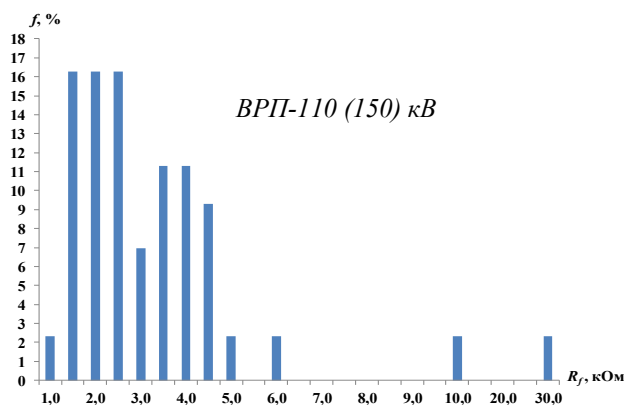


Рис. 2 – Розподіл частоти f опору основи для підстанцій НЕК «Укренерго»

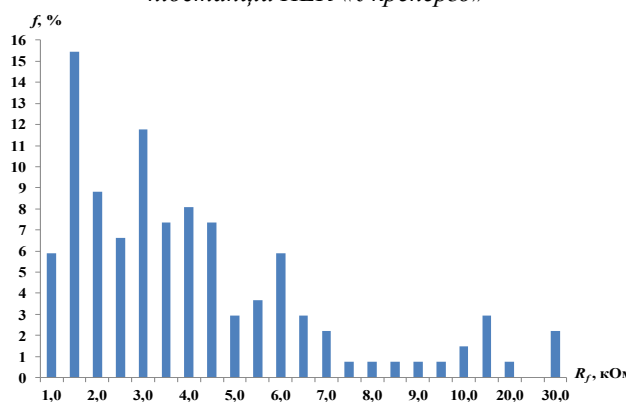


Рис. 3 – Розподіл частоти f опору основи для підстанцій обленерго

Таблиця 2 – Необхідність облаштування місця обслуговування для підстанцій облэнерго

Назва облэнерго	Кількість підстанцій, %:		Діапазон значень необхідного R_f , кОм:	
	проаналізованих від загальної кількості	необхідне збільшення R_f	мінімальне	максимальне
Дніпрооблэнерго	100,0	48,6	1,0	13,0
Донецькоблэнерго	91,5	58,1	0,7	10,0
Житомироблэнерго	21,6	36,4	5,7	8,0
Сумиоблэнерго	100,0	56,8	2,5	28,0
Харківоблэнерго	52,3	71,1	0,9	28,0
Крименерго	68,0	15,7	1,5	4,5
Кіровоградоблэнерго	86,4	26,3	0,8	3,7

Можна виділити дві різних за призначенням групи: технологічні (природні) – які слугують для виконання певних функцій, але розташовані так, що можуть бути використані при обслуговуванні обладнання та спеціально створені (штучні). До перелічених груп відносяться наступні способи:

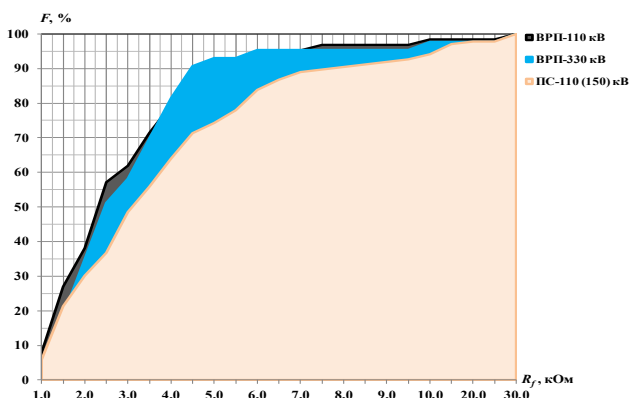


Рис. 4 – Накопичена частість F для підстанцій класом напруги 110–330 кВ

1. Технологічні:
 - залізобетонні басейни з шаром щебеню (біля силових трансформаторів та вимикачів);
 - асфальтові доріжки;
 - залізобетонні конструкції кабельних каналів або лотків;
2. Спеціально створені:
 - металева конструкція;
 - шар щебеню;
 - залізобетонні плити;
 - бетонні плити без риштунку;
 - бетонні плити з домішками гравію;
 - тротуарні плитки;
 - полімерпіщані плити.

З метою визначення найефективнішого способу облаштування місця обслуговування обладнання авторами були виконані вимірювання опору основи на сухій поверхні а також при її зволоженні (імітація найгірших погодних умов). Вимірювання R_f проводилося за методом амперметра-вольтметра. Опір визначався між заземлювальним провідником та потенційним електродом, що імітує дві ступні людини (див. рис. 5) [11].

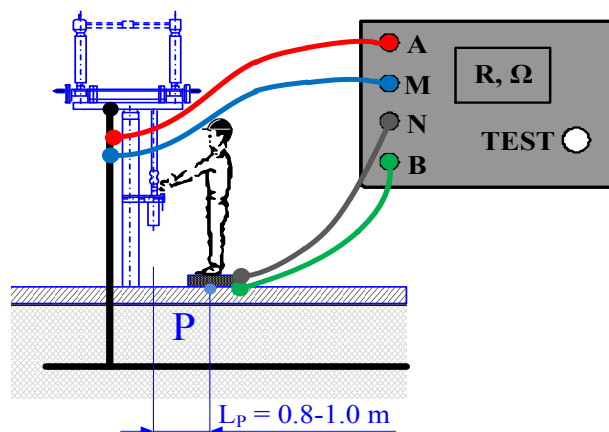


Рис. 5 – Вимірювання опору R_f

В табл. 3 наведено усереднені результати вимірювання, отримані для сухої поверхні, а також через 5 хв. та 15 хв. після зволоження. Слід зазначити, що для формування вибірки використовувалися лише значення для облаштованих місць з площею від 1 м².

В зв'язку з тим, що під час снігопаду, дощу, туману забороняються роботи, які вимагають застосування захисних ізолювальних засобів [12] (до них належать роботи з оперативних перемикачів), орієнтуватися слід на час після закінчення опадів, тобто через 5–15 хв.

Проаналізуємо способи місць обслуговування з технологічної групи. Асфальтовані доріжки, залізобетонний кабельний канал (лоток), залізобетонний басейн з щебенем займають приблизно однакову нішу з точки зору електробезпеки, проте мають певні особливості:

1) асфальтові доріжки є відносно простим, але дієвим з точки зору електробезпеки, способом. В суху пору року та через 15 хв. після зволоження вони гарантують електробезпеку для всіх випадків, а через 5 хв. після зволоження – 95 %. При цьому даний спосіб має наступні особливості та недоліки:

- висока вартість;
- необхідність використання спеціальної техніки;
- деградація. Цей процес може розвиватися

досить швидко, що значно впливає на опір основи (на ПС-110 кВ ПАТ «ДТЕК Високовольтні мережі» на низці площадок після зимового сезону з'явилися тріщини, крізь які проросла трава. При проведенні вимірювання опір на такому місці через 5 хв. після зволоження становив 1,8 кОм, хоча на інших непошкоджених – 15–50 кОм);

Таблиця 3 – Експериментально визначені значення опору основи

Спосіб виконання:	Опір основи R_f , кОм:			
	Суха поверхня	Волога поверхня		
		одразу	через 5 хв.	через 15 хв.
Технологічні (природні):				
Залізобетонний басейн з шаром щебеню	$\geq 100,0$	50,0–60,0	50,0–60,0	60,0–75,0
Кабельний канал (лоток)	$\geq 100,0$	40,0–60,0	40,0–60,0	60,0–70,0
Асфальтові доріжки	$\geq 100,0$	10,0–15,0	12,0–50,0	59,0–70,0
Спеціально створені (штучні):				
Металева конструкція приєднана до ЗП	0,0	0,0	0,0	0,0
Металева конструкція неприєднана до ЗП	0,001–0,1	0,001–0,1	0,001–0,1	0,001–0,1
Шар щебеню	$\geq 10,0$	0,8–55,0	2,0–55,0	3,0–60,0
Залізобетонні плити	9,9–22,0	0,7–1,4	1,4–1,6	1,8–2,2
Бетонні плити без риштунку, тротуарна плитка	4,0–13,8	0,25–0,6	1–1,5	1,0–2,5
Бетонні плити (тротуарна плитка) з домішками гравію	$\geq 50,0$	0,4–1,2	1,0–1,8	1,5–5,0
Полімерпіщані плити	$\geq 100,0$	2,3–4,0	20,0–24,0	37,0–42,0

2) залізобетонний кабельний канал (лоток) має високі характеристики з точки зору електробезпеки (охоплюють 100 % енергооб'єктів незалежно від зволоження) та є довговічним (практика показує, що може знаходитися в експлуатації понад 30 років) проте:

– непризначений безпосередньо для виконання оперативних перемикачів;

– наявність його біля обладнання носить випадковий характер;

– має висоту від рівня землі від 20 см, що може бути незручним при виконанні оперативних перемикачів;

3) залізобетонний басейн з шаром щебеню споруджують під оливонаповненим обладнанням (силовими трансформаторами, вимикачами, реакторами тощо). Його основним призначенням є відведення трансформаторної оливи у випадку витікання. Облаштування їх є надзвичайно дорогавартісним й виконується при будівництві відкритого розподільчого пристрою або при масштабній реконструкції.

Далі проаналізуємо способи місць обслуговування з групи спеціально створених. Вони суттєво розрізняються за способом монтажу, опором, а також за відновленням ізоляційних властивостей після зволоження:

1) металева конструкція приєднана до ЗП є найбільш ефективною з точки зору електробезпеки облаштування місця обслуговування (забезпечує допустиме значення напруги дотику у 100 % випадків). В цьому разі напруга дотику за будь-якої погоди буде майже дорівнювати нулю, однак недоліками такої конструкції є:

– неможливість її встановлення для цілої низки існуючого обладнання;

– значна висота ($\geq 0,3$ м) може зробити виконання перемикачів незручним. Якщо зробити площадку меншої висоти, то її буде засипати снігом або ґрунтом, що при ОЗЗ призведе до виникнення різниці потенціалів між нею та конструкцією обладнання, до того ж контакт з таким середовищем на переході з повітрям призводить до виникнення підвищеного рівня корозії;

– вартість облаштування місця обслуговування в такий спосіб буде найвищою (авторами не враховувалось вартість способів, віднесених до технологічних). Крім того, рекомендації щодо зменшення в такий спосіб напруги дотику відсутні в національних нормативних документах;

2) металева конструкція неприєднана до ЗП є найгіршим варіантом з точки зору електробезпеки, що видно з виразу (1): низьке значення опору основи при збереженні різниці потенціалів призводить до високих значень напруги дотику. Тому площадки обслуговування мають в обов'язковому порядку бути приєднаними до спільного ЗП, а якість цього приєднання періодично повинна контролюватися;

3) використання щебеню найбільш ефективне при засипанні всієї території відкритого розподільчого пристрою. При цьому забезпечення тривалості використання такого покриття досить складне та матеріально витратне, так як попередньо необхідно видалити шар дерну, захистити поверхню агротканиною чи плівкою, щоб запобігти проростанню трави та поглинанию щебеню ґрунтом (такий спосіб виконання забезпечує понад 50 кОм опору основи та охоплює 100 % випадків). Невиконання цієї умови призводить до падіння опору основи до низьких значень 0,8–1,5 кОм. Крім того, виконувати оперативні перемикачів на щебені в поганих погодних умовах може бути травмонебезпечним (покриття стає слизьким);

4) залізобетонні плити:

– мають досить високий опір в сухому стані й іноді при зволоженні,

– є зручними в укладанні;

– експлуатація призводить до зношення покриваючого шару бетону та щебеню, починають проступати металеві частини, які знижують опір основи;

– відносно довго висихають, відновлюючи ізолюючі властивості (див табл. 4). Використання таких місць обслуговування не рекомендується;

5) бетонні плити без риштунку та тротуарна плитка (іноді з домішками гравію) є:

– зручними при монтажі;

Таблиця 4–Відсоток охоплення необхідного опору основи R_f для різних типів облаштування місця обслуговування

Спосіб виконання:	Відсоток охоплення, %			
	Суха поверхня	Волога поверхня		
		одразу	через 5 хв.	через 15 хв.
Технологічні (природні):				
Залізобетонний басейн з шаром щебеню	100	100	100	100
Кабельний канал (лоток)	100	100	100	100
Асфальтові доріжки	100	90–95	93–96	100
Спеціально створені (штучні):				
Металева конструкція приєднана до ЗП	100	100	100	100
Металева конструкція неприєднана до ЗП	0	0	0	0
Шар щебеню	90–100	1–100	10–100	35–100
Залізобетонні плити	90–100,0	1–10	17–20	24–30
Бетонні плити без риштунку, тротуарна плитка	60–95	<1	6–20	6–45
Бетонні плити (тротуарна плитка) з домішками гравію	100	6–10	6–30	27–92
Полімерпіщані плити	100	32–80	95–97	100

- не потребують використання спецтехніки;
- мають естетичний вигляд;
- можуть мати антиковзаючу поверхню (важливо для обслуговування обладнання за несприятливих погодних умов);

- забезпечують необхідне значення опору основи для 10–25 % енергетичних об’єктів. У разі використання автори рекомендують обов’язкові попередні випробування для перевірки опору;

б) полімерпіщані плити:

- мають достатньо високі показники з точки зору електробезпеки (через 5хв. після зволоження забезпечують допустиме значення напруги для 95 % об’єктів);

- є зручними в монтажі;
- не потребують спецтехніки;
- відносно дешеві;
- мають естетичний вигляд;
- можуть мати антиковзаючу поверхню.

Полімерпіщані плити нещодавно стали використовуватися в якості ізолюючого шару, тому невідома залежність опору основи впродовж тривалого терміну експлуатації. Авторами встановлено, що через рік експлуатації на підстанції АТ "ДТЕК Донецькобленерго" опір основи залишався незмінним в межах статистичного розкиду 21–24 кОм через 5 хв. після зволоження.

Висновки

Вперше на основі статистичних даних було проаналізована необхідність облаштування місця оперативного обслуговування обладнання для забезпечення припустимого значення напруги дотику на діючих енергетичних об’єктах. Встановлено, що для підстанцій класом напруги 110 (150 кВ) його необхідно облаштувати в середньому на 48 % об’єктів, а для підстанцій НЕК "Укренерго" класом напруги 330 (220) кВ – 55 % для розподільчого пристрою 330 (220) та 76 % для розподільчого пристрою 110 (150) кВ.

Встановлено, що забезпечення опору основи в місці обслуговування на рівні 3 кОм дозволяє знизити значення напруги дотику до допустимого для 50 %

підстанцій класом напруги 110 (150) кВ, а опір 12,5 кОм – для 95 %. Для підстанцій 330 (220) кВ значення опору основи становить для 50% та 95 % – 2,5 кОм та 6,0 кОм відповідно.

На основі результатів вимірювання на діючих підстанціях було встановлено, що найменш ефективними варіантами облаштування місця обслуговування є бетонні плити без домішок, тротуарна плитка та щебінь без агротканини: їх діапазон охоплення складає 6–30 % через 5 хв після зволоження та 6–45% через 15 хв. Найефективнішим способом зниження напруги дотику до допустимої величини є використання металевих площадок обслуговування приєднаних до ЗП або асфальтових доріжок (діапазон охоплення – 100%) за дотриманням відповідних умов експлуатації.

Оптимальним за співвідношенням якість/ціна є облаштування місць обслуговування за допомогою полімерпіщаних плит. Вони забезпечують допустиме значення напруги дотику в 95–97 % випадків через 5 хв. після зволоження та у 100 % – через 15 хв.

Автори окремо наголошують, що облаштування місць обслуговування обладнання є додатковим заходом щодо зменшення напруги дотику і не віднімає необхідності конструктивного облаштування ЗП відповідно до вимог чинних нормативних документів.

Список літератури

1. BS EN 50522:2010. *Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c.* London: BSI, 2012. 104 p.
2. IEEE Std 80-2013 *Guide for Safety in AC Substation Grounding.* New York, IEEE, 2013. 226 p. doi:10.1109/IEEESTD.2015.7109078.
3. IEEE Standard 81-2012. *IEEE Guide for measuring Earth resistivity, ground impedance, and Earth surface potentials of a grounding system.* New York: IEEE, 2012. 86 p. doi: 10.1109/ieeestd.2012.6392181.
4. *Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V ~ und 1500 V =. Teil 1: Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen).* (ÖVE/ÖNORM E 8001-1). Vienna: Österreichisches Normungsinstitut, 2010. 138 s.

5. *Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstrom-verordnung)*. Bern Der Schweizerische Bundesrat, 2016. 34 p.
6. *ABNT. NBR 15751: Sistemas de aterramento de subestações*. Rio de Janeiro, 2009. p. 47.
7. *Правила улаштування електроустановок*. Міненерговугілля України. Харків: Форт, 2017. 760 с.
8. *Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009*. Київ: Мінапалівернерго України, 2010. 54 с.
9. Коліушко Д. Г., Руденко С. С. Фактори впливу на напругу дотику з огляду розробки рекомендацій для реконструкції заземлювального пристрою. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 3. С. 29-36. doi: 10.15407/techned2019.03.029.
10. Permal N., Osman M., Ariffin A. M. and Kadir M. Z. A. A. The Impact of Substation Grounding Grid Design Parameters in Non-Homogenous Soil to the Grid Safety Threshold Parameters. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 37497-37509. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3063018.
11. Коліушко Д. Г., Руденко С. С., Фуряєв Ю. О. Аналіз методів визначення опору розтікання струму зі ступнів людини. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2022. № 3 (13). С. 93-98. doi: 10.20998/2413-4295.2022.03.14..
12. *Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів ДНАОП 0.00-121-98*. Київ: Основа, 1998. 380 с.
3. *IEEE Standard 81-2012. IEEE Guide for measuring Earth resistivity, ground impedance, and Earth surface potentials of a grounding system*. New York. IEEE, 2012. 86 p. doi: 10.1109/ieeestd.2012.6392181.
4. *Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V ~ und 1500 V =. Teil 1: Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen)*. (ÖVE/ÖNORM E 8001-1). Vienna. Österreichisches Normungsinstitut, 2010. 138 s.
5. *Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstrom-verordnung)*. Bern Der Schweizerische Bundesrat, 2016. 34 p.
6. *ABNT. NBR 15751: Sistemas de aterramento de subestações*. Rio de Janeiro, 2009. p. 47.
7. *Rules of the device electroinstallations. General rules*. Minenergovugillya Ukrayiny, Kharkiv. Fort, 2017. 760 p.
8. *Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction. SOU 31.2-21677681-19:2009*. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny, 2010. 54 p.
9. Koliushko D. G., Rudenko S. S. The factors of the influence on the touch voltage from the review of the development of recommendations for the reconstruction of the grounding device. *Technical Electrodynamics*, 2019, no. 3, pp. 29-36, doi: 10.15407/techned2019.03.029.
10. Permal N., Osman M., Ariffin A. M. and Kadir M. Z. A. A. The Impact of Substation Grounding Grid Design Parameters in Non-Homogenous Soil to the Grid Safety Threshold Parameters. *IEEE Acces*, 2021, vol. 9, pp. 37497-37509, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3063018.
11. Koliushko D. G., Rudenko S. S., Furaiev Y. O. Analysis Of Methods Determination Ground Resistance of Human Foot. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*, 2022, no. 3(13), pp. 93-98, doi: 10.20998/2413-4295.2022.03.14.
12. *Rules for the safe operation of electrical installations of consumers DNAOP 0.00-121-98*. Kyiv. Osnova, 1998. 380 p.

References (transliterated)

1. *BS EN 50522:2010. Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c.* London. BSI, 2012. 104 p.
2. *IEEE Std 80-2013 Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York. IEEE, 2013. 226 p. doi:10.1109/IEEESTD.2015.7109078.
11. Koliushko D. G., Rudenko S. S., Furaiev Y. O. Analysis Of Methods Determination Ground Resistance of Human Foot. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*, 2022, no. 3(13), pp. 93-98, doi: 10.20998/2413-4295.2022.03.14.
12. *Rules for the safe operation of electrical installations of consumers DNAOP 0.00-121-98*. Kyiv. Osnova, 1998. 380 p.

Відомості про авторів (About authors)

Коліушко Денис Георгійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту "Молнія", м. Харків, Україна; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Denis Koliushko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher of Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0003-3112-4260; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Руденко Сергій Сергійович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту "Молнія", м. Харків, Україна; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Serhii Rudenko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher of Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0002-2544-1545, e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Істомін Олександр Євгенійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту "Молнія", м. Харків, Україна; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Oleksandr Istomin – researcher of Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0002-5709-6459, e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Коліушко Д. Г., Руденко С. С., Істомін О. Є. Вибір способу облаштування місця обслуговування обладнання для забезпечення допустимого значення напруги дотику. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 75-81. doi:10.20998/2413-4295.2022.04.12.

Please cite this article as:

Koliushko D., Rudenko S., Istomin O. Selection of the technique of arrangement of equipment service area to provide the permissible touch voltage. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4(14), pp. 75-81, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.12.

Надійшла (received) 06.10.2022

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

- Костіков А. О., Тарасова В. О., Кузнецов М. О., Ганжа М. Г., Мазур А. О.* Оцінка ефективності парогазових установок з інтеграцією твердооксидних паливних елементів 3
- Крилов Д. С., Холод О. І.* Параметрична система керування трифазним активним випрямлячем з фіксованою частотою модуляції 11

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

- Єгорова І. М., Ільченко К. В.* Особливості тестування інтерфейсу користувача 18
- Кондрашов С. І., Григоренко І. В., Опришкін О. С.* Розроблення ситуаційної системи з нечіткою логікою для другого рівня інформаційно-виміральної системи 24
- Метельов В. О., Марусенко О. М., Баскаков О. Р.* Розробка текстового редактора для операційної системи UNIX 35
- Метельов В. О., Марусенко О. М., Бродський Г. Ю.* Розробка застосунку для аналізу та дослідження параметрів наукових текстових документів, здатного працювати з кількома операційними системами 41
- Мигаль Г. В., Протасенко О. Ф.* Безпілотні системи: проблеми людського фактора 46
- Сороколат Н. А., Фатієва Л. Ю.* Застосування функції помилок для оцінювання якості об'єктів кваліметрії 53
- Татарінова О. А., Марусенко О. М., Ісаєв В. В.* Розробка та програмна реалізація алгоритмічної моделі трансляції документів на різноманітних пристроях 59

ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Данилюк Р. В., Мельник С. Р.* Вплив каталізаторів на реакції між три- і діетаноламінами та етилолеатом 65
- Кравченко К. М., Тульський Г. Г.* Вплив матеріалу катоду на суміщені катодні процеси у водних розчинах заліза (II) сульфату 70

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕМС ТА БЛИСКАВКОЗАХИСТ

- Коліушко Д. Г., Руденко С. С., Істомін О. Є.* Вибір способу облаштування місця обслуговування обладнання для забезпечення допустимого значення напруги дотику 75

CONTENTS

ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

- Kostikov A., Tarasova V., Kuznetsov M., Ganzha M., Mazur A.* Efficiency evaluation of steam-gas plants with the solid oxide fuel cells integration 3
- Krylov D., Kholod O.* Parametric control system of a three-phase active rectifier with a fixed modulation frequency 11

INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

- Igorova I., Ilchenko K.* Peculiarities of UI testing 18
- Kondrashov S., Hryhorenko I., Opryshkin O.* Development of a situation system with fuzzy logic for the second level of the information and measurement system 24
- Mietielov V., Marusenko O., Baskakov O.* Development of a text editor for UNIX operating system 35
- Mietielov V., Marusenko O., Brodskiy G.* Development of an application for the analysis and research of the parameters of scientific text documents capable of working with several operating systems 41
- Mygal G., Protasenko O.* Unmanned systems: human factor problems 46
- Sorocolat N., Fatieva L.* Application of the error function for assessing the quality of qualimetry objects 53
- Tatarinova O., Marusenko O., Isaiev V.* Development and software implementation of an algorithmic model for broadcasting documents on various devices 59

CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY

- Danyliuk R., Melnyk S.* The catalysts impact on the tri- and diethanolamine and ethyl oleate interaction 65
- Kravchenko K., Tulsky G.* Effect of cathode material on combined cathodic processes in aqueous solutions of iron (II) sulfate 70

ELECTROPHYSICAL TECHNOLOGIES, EMC AND LIGHTNING PROTECTION

- Koliushko D., Rudenko S., Istomin O.* Selection of the technique of arrangement of equipment service area to provide the permissible touch voltage 75

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ".
СЕРІЯ: НОВІ РІШЕННЯ В СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

Збірник наукових праць

№ 4(14)' 2022

Відповідальний редактор: Є. І. Сокол, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор: С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Україна
Відповідальний секретар: Р. С. Томашевський, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск: д-р техн. наук, проф. Р. С. Томашевський

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Рада молодих вчених, тел. (057)707-69-37, e-mail: vestnik.nsm@gmail.com

Підп. до друку «26» грудня 2022 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10,6. Облік.вид.арк. 5,9.
Тираж 50 прим. Зам. № 290. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК №5478 від 21.08.2017
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
