

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**

№ 2(8)' 2021

No. 2(8)' 2021

Збірник наукових праць

Collection of Scientific papers

Видання засноване у 1961 р.

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2021

Kharkiv
NTU "KhPI", 2021

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», 2021. — № 2(8). — 138 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., 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., 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
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
Чжан К. Л., проф., Вроцлавський технологічний університет, Польща
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., 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., 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
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
Chrzan K. L., prof., Wroclaw University of Technology, Poland
Shevchenko S. Yu., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Shestopalov A. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine
Shidakova-Kamenyuka E. G., HDUHT, Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 5 від 28 травня 2021 р.

УДК 621.746

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.01

НОВІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЗМІННИХ ДЕТАЛЕЙ ГРУНТООБРОБНОЇ СІЛЬГОСПТЕХНІКИ

М. Г. АСКЕРОВ

відділ № 10, ІПМНАН України, Київ, УКРАЇНА
e-mail: mukafatask@gmail.com

АНОТАЦІЯ Представлений аналіз результатів практичного застосування литих змінних деталей навісного ґрунтообробних сільгосптехніки при експлуатації в ряді аграрних підприємств Полтавської області при обробці понад 60 тисяч гектарів протягом декількох лет. Приведені порівняльні дані ресурсу деталей виготовлених з високоміцного бейнітного чавуну і сталевих серійних аналогів вітчизняного та зарубіжного виробництва. Вказані переваги способу виготовлення методами лиття в порівнянні з традиційним способом виготовлення методом штампування. Дана технологія дозволяє легко вносити корективи в конструкцію лап культиваторів тим самим забезпечуючи нову якість обробки ґрунту і підрізання кореневої системи бур'янів, що усуває необхідність застосування гербіцидів. В основу даної технології покладено застосування композиційних комплексних модифікаторів, що виготовляються прокаткою порошкових сумішей з пластичних і крихких компонентів при необхідному дотриманні пропорцій їх співвідношення. Використання порошкових прокатних модифікаторів забезпечує необхідні властивості і структуру литого металу необхідні для проведення подальшої термічної обробки. Обґрунтовано отримання високої зносостійкості литих виробів завдяки появі TRIP-ефекту і постійного оновлення зносостійкого поверхневого шару при роботі.

Ключові слова: композиційні комплексні модифікатори; високоміцний бейнітний чавун; TRIP-ефект

NEW MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF REPLACEABLE PARTS OF TILLAGE AGRICULTURAL MACHINERY

M. ASKEROV

Department № 10, IPMS NAS of Ukraine, Kiev, UKRAINE

ABSTRACT The analysis of results of practical application of cast replaceable details of hinged tillage agricultural machinery at operation in a number of the agricultural enterprises of the Poltava region at processing of more than 60 thousand hectares within several years is presented. Comparative data of the resource of parts made of high-strength bainitic cast iron and steel serial analogues of domestic and foreign production are given. The advantages of the method of manufacturing by casting methods in comparison with the traditional method of manufacturing by stamping. This technology allows you to easily make adjustments to the design of the cultivator legs, thus providing a new quality of tillage and pruning of the root system of weeds, which eliminates the need for herbicides. The basis of this technology is the use of composite complex modifiers made by rolling powder mixtures of plastic and brittle components with the necessary observance of the proportions of their ratio. The use of powder rolled modifiers provides the necessary properties and structure of the cast metal required for further heat treatment. It is substantiated to obtain high wear resistance of cast products due to the appearance of TRIP-effect and constant updating of wear-resistant surface layer during operation.

Keywords: composite complex modifiers; high-strength bainite cast iron; TRIP effect

Вступ

Високоміцний чавун з кулястою формою графіту (ВЧШГ) - матеріал нового покоління, який поєднує високу міцність і задовільну пластичність. Великий вклад у створення цього матеріалу в кінці минулого сторіччя внесли українські вчені [1-4]. Подальше вдосконалення цього матеріалу пов'язане з використанням спеціальної термічної обробки, яка отримала назву аустемперінга (austempering), а отриманий в наслідок такої обробки чавун було названо ADI (austempering ductile iron). Цей науковий

напрямок успішно розвивають як в нашій країні [5,6] так і за кордоном [7,8]

Після оптимальної термообробки (ізотермічне гартування при 280-380 °С) цей матеріал демонструє унікальну здатність до мартенситного перетворення під дією деформації, так званий, TRIP (transformation induce plasticity) ефект. Цей особливий механізм зміцнення, сприяє підвищенню опору зношуванню завдяки утворенню високоміцного деформованого шару на поверхні тертя, підвищенню втомних характеристик завдяки утворенню стискаючих напружень в пластичній зоні тріщини, та покращенню демпфуючих властивостей завдяки утворенню в

області мартенситного перетворення зворотніх двійників. Це цікаве фізичне явище широко обговорюється в науковій літературі [6-9], а його прояв широко використовується на практиці [10-12].

Виходячи з нагальної потреби вітчизняних аграріїв у розробці конкурентноздатної технології виробництва виготовлення змінних деталей для ґрунтообробної сільгосптехніки та враховуючи унікальну здатність ADI матеріалів опиратись зношуванню, в Інституті проблем матеріалознавства НАНУ в останні 10-15 років проводяться роботи по створенню технології виготовлення деталей сільгосподарської техніки шляхом литва з високоміцного бейнітного чавуну [13-19].

Мета роботи

Продемонструвати, як зазначені переваги ADI сприяють підвищенню механічних та службових характеристик виробів сільськогосподарського призначення, та окреслити перспективи використання цього унікального матеріалу.

Результати та обговорення

Відомо, що зношування земле оброблювальної техніки відбувається під дією зсувних навантажень на границі розподілу між інструментом та ґрунтом, який виконує роль абразиву. Але, якщо у випадку сталевих або керамічних виробів, зсувна деформація сприяє деградації виробу, то у випадку чавуна в деформованому шарі відбувається мартенситне перетворення, яке різко збільшує його твердість. Результати вимірювання методом наноіндентування показують, що в при поверхневому шарі вона сягає 8,5 ГПа [20]. Це вдвічі вище за твердість матриці (4 ГПа). Глибина надтвердого при поверхневого шару сягає ~ 2-3 мкм.

Ці дані дозволяють прогнозувати динаміку процесу зношування з урахуванням утворення зміцненого шару. Виходячи з даних про зношування бейнітного чавуна [10], згідно до яких при роботі у піску вологого яру зразок площею 1 см² втрачає 22 міліграми за 1 км та беручи питому вагу чавуну ~ 6,8 г/см³, визначаємо, що його розмір при зношенні по площині зменшиться на 30 мкм за 1 км, а зміцнений шар товщиною в 2 мкм буде зношений за 60 м роботи. З врахуванням швидкості руху сучасної сільськогосподарської техніки, ця відстань може бути подолана за 5 секунд. Оскільки мартенситне перетворення відбувається за зсувним механізмом зі швидкістю, що наближається до швидкості звуку, за цей час на зміну зношеному шару виникає новий зміцнений шар з підвищеною зносостійкістю.

Підвищення опору руйнування також тісно пов'язане з мартенситним перетворенням. В цьому випадку процес розповсюдження тріщини уповільнюється через утворення мартенситної фази в

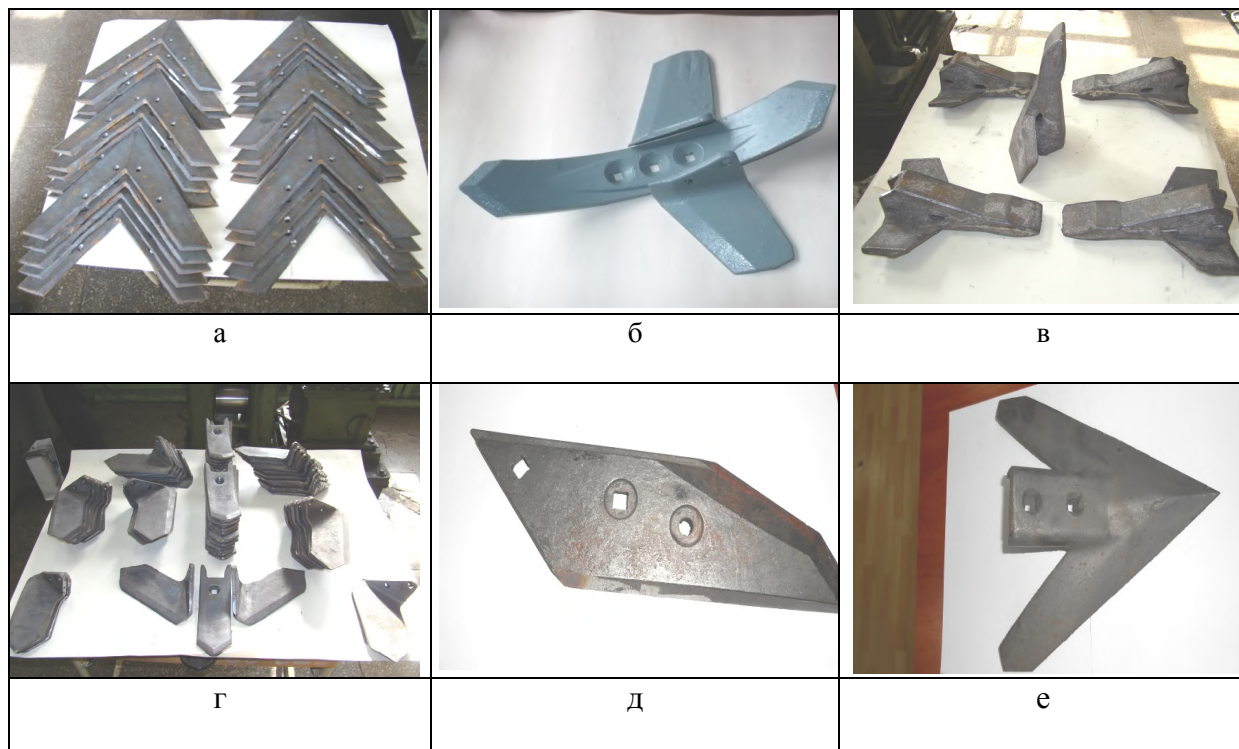
пластичній зоні попереду тріщини та виникнення завдяки цьому стискаючих напружень. В цьому випадку спостерігається не тільки підвищення тріщиностійкості але і різке зменшення розтріскування навколо вершини тріщини.

Ще одним дуже важливим наслідком прояву індукованого мартенситного перетворення є можливість контролювати це явище за допомогою оптимальної термообробки в залежності від умов роботи ґрунтооброблювального інструменту. Встановлено [21], що бейнітний чавун, загартований при різних температурах, має два інтервали зміцнення: в області малих деформацій швидкість зміцнення тим вища, чим нижча температура гартування; в області великих деформацій, швидкість зміцнення значно вища в матеріалах, загартованих при більш високих температурах. Ефект пояснюється зміною механізму зміцнення від дислокаційного при малих деформаціях до двійникового в області дії TRIP-ефекту. Таким чином, вироби, що працюють при малих навантаженнях і не піддаються великим деформаціям (лапи культиваторів) доцільно загартовувати при низьких температурах, а більш навантажені (леміші, розрихлювачі) – при більш високих

Польові випробування литих лемішів і лап культиваторів, що проведені в різних господарствах Київської Черкаської та Одеської областях показали, що на важких ґрунтах-чорноземах напрацювання на один литий леміш склало 102-110га, в ПП «Церера-Агро-Транс» на плузі ПЛН-8-35 в агрегаті з трактором К-701 напрацювання при орних роботах на супіщаних ґрунтах склало 102 га при цьому литі леміші зберегли ресурс для роботи в наступні періоди. Литі лапи культиваторів за декілька років напрацювали 230га. При цьому сталеві серійні замінялися 6-7 разів. Позитивним моментом при роботі литих деталей крім значного збільшення ресурсу є велика жорсткість їх конструкції. Використання можливостей лиття дозволило вносити конструктивні зміни з метою поліпшення якості обробки ґрунту.

Розроблена технологія [22-26] може бути використана і для розширення номенклатури виробів при внесенні відповідних коректив в режими термообробки (рис. 1). Собівартість виготовлення литих деталей значно (в 2-5 разів) нижча вартості сталевих деталей зарубіжного виробництва.

Стосовно перспектив використання цієї технології доречно зазначити, що в останні роки Україна впевнено виходить на чільні позиції з експорту сільськогосподарської продукції. Ефективність роботи аграрної галузі та її конкурентна спроможність тісно пов'язана з ціною та якістю оброблювальної техніки. Згідно даних ДЕРЖГЕОКАДАСТРУ в Україні 42,4 млн га – землі сільськогосподарського призначення, з яких щорічно обробляється понад 32 млн гектарів. При



а – плоскорези для ПП «Агроэкологія»; б – комплект розпушувачів для культиватора «Vadershtadt»; в – долота-розпушувачі культиватора «Soil-Pro»; г – деталі розпушувача культиватора «TIGER»; д – насадка на леміш фірми «Lemken»; е – лапа культиватора «Great Plains» (аналог «John Deer»)

Рис. 1 – Деякі зразки литих деталей ґрунтообробної сільгосптехніки:

цьому середнє напрацювання з на одиницю сільгоспобладнання (леміші, лапи культиваторів, диски плугів і т.п.) становить 30-40 га.. Тобто, на кожну технологічну операцію обробки землі використовується до мільйона! Змінних деталей за сезон. Кращі зразки зарубіжних фірм обробляють до 100 - 150 га і, незважаючи на їх значно більш високу ціну, їх використання, наразі, виявляється більш економічно доцільним. Гостро постає питання про створення альтернативних технологій, які повинні поєднувати відносно дешевий метод отримання виробів з його високими службовими властивостями. С цьому сенсі отримані результати свідчать, що розроблена ливарна технологія демонструє реальні шляхи до вирішення цієї проблеми.

Ливарна технологія виготовлення змінних деталей землі оброблювальної техніки дозволяє легко вносити корективи в конструкцію лап культиваторів тим самим забезпечуючи нову якість обробки ґрунту і підрізання кореневої системи бур'янів, що усуває необхідність застосування гербіцидів.

Отримані результати свідчать, що розроблена ливарна технологія демонструє реальні шляхи до вирішення проблеми створення вітчизняної конкурентноспроможної технології виготовлення змінних деталей для обробки ґрунту, яка поєднує відносно дешевий метод отримання виробів з його високими службовими властивостями.

Список літератури

1. Ващенко К. И., Софрони Л. *Магниевый чугун*. Киев: Машгиз, 1960. – 485 с
2. Ващенко К. И., Рудой А. П. Поверхностное натяжение чугуна. *Литейное производство*. 1962. № 6. С. 24 – 27.
3. Волощенко М. В. *Термическая обработка высокопрочного чугуна*. К.: Гостехиздат УССР, 1961. – 97 с.
4. Бубликов В. Б., Ясинский А. А., Сыропоршнев Л. Н., Козак Д. С., Бачинский Ю. Д. Влияние содержания кремния и скорости охлаждения на образование отбела в отливках из модифицированного в ковше

Висновки

Бейнітний чавун після оптимальної термообробки (ізотермічне гартування при 280-380 °С) демонструє унікальну здатність до мартенситного перетворення під дією деформації, так званий, TRIP (transformation induce plasticity) ефект. Фазове перетворення, яке відбувається під дією пластичної деформації сприяє значному підвищенню зносостійкості та збільшенню опору руйнуванню.

- высокопрочного чугуна. *Процессы литья*. 2009. № 4. С. 17 – 24.
5. Волощенко М. В., Литовко В. И., Зеленый Б. Г. Влияние кремния на механические свойства изотермически закаленного чугуна с шаровидным графитом. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1964. № 7. С. 20 – 23.
 6. Найдек В. Л., Гаврилюк В. П., Неижко И. Г. *Бейнитный высокопрочный чугун*. К., 2008. – 140 с.
 7. Adel Nofal. Advances in the Metallurgy and Applications of ADI. *Journal of Metallurgical Engineering (ME)*. 2013. Vol. 2. Issue 1. P. 1-18.
 8. Mohammad Baba Zadeh, Hamid Pour Asiabi. Wear Characteristics of ADIs: A Comprehensive Review on Mechanisms and Effective Parameters. *J. Basic. Appl. Sci. Res.* 2013. 3(2). P. 646-656.
 9. Гогаев К. А., Подрезов Ю. Н., Волощенко С. М., Аскеров М. Г., Минаков Н. В., Луговской Ю. Ф. Анализ деформационного упрочнения ADI при температурах термической закалки. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 1 (3). С. 3-8. doi:10.20998/2413-4295.2020.03.01.
 10. Harding R. A. The production, properties and automotive applications of austempered ductile iron. *Metals and Materials*. 2007. 45(1). P. 1–16.
 11. Brezina R., Filipek J., Šenberger J. Application of ductile iron in the manufacture of ploughshares. *Res. Agr. Eng.* 2004 (2). 50. P. 75–80.
 12. Волощенко С. М., Гогаев К. А., Аскеров М. Г., Мирапольский А. М. Применение высокопрочного бейнитного чугуна для производства сменных деталей грунтообрабатывающей сельхозтехники. *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2017. № 32 (1254). С. 14-18. doi: 10.20998/2413-4295.2017.32.02.
 13. Волощенко С. М., Гогаев К. А., Подрезов Ю. Н., Аскеров М. Г., Мирапольский А. М. Возможности импортозамещения сменных деталей грунтообрабатывающей сельхозтехники литыми изделиями из высокопрочного бейнитного чугуна. *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. № 1. С. 14-19. doi: 10.20998/2413-4295.2019.01.02.
 14. Гогаев К. А., Подрезов Ю. Н., Волощенко С. М., Аскеров М. Г., Ульшин В. И., Бега М. Д., Варченко В. Т., Радченко О. К., Грибков В. К., Сидорчук О. М. Визначення складу компонентів модифікаторів для високоміцного чавуну з феритною основою, та розробка технологічних параметрів виготовлення композиційних модифікаторів прокатуванням. Виготовлення дослідних зразків для визначення механічних властивостей та зносостійкості. Звіт про н.-д. Роботу № держреєстрації 0107U00143 ІПМ НАН України. Київ. 2007, 32с.
 15. Волощенко С. М., Гогаев К. А., Аскеров М. Г., Радченко О. К., Евич Я. И. Использование метода прокатки для производства комплексных композиционных модификаторов. *Процессы литья*. 2007. №5. С. 41-44.
 16. Гогаев К. О., Волощенко С. М., Аскеров М. Г. Исследование и разработка технологии производства износостойких литых деталей с использованием композиционных комплексных модификаторов из порошковых материалов. ИПМ НАНУ, г. Киев, декабрь 2009 г.
 17. Волощенко С. М., Ульшин В. И., Ульшин С. И., Аскеров М. Г., Бега М. Д. Термічна обробка лемешів із високоміцного чавуну. *Металознавство та обробка металів*. м. Київ ІПМ НАНУ, ІМНУ, 04.2009 р.
 18. Гогаев К. О., Волощенко С. М., Аскеров М. Г. Повышение ресурса эксплуатации лемехов при пахотных работах за счет использования высокопрочного бейнитного чугуна. *Тез. докладов 6 Международной конференции «Материалы и покрытия в экстремальных условиях*. 20-24.09.2010, Большая Ялта, Понизовка. Украина. С. 338.
 19. Волощенко С. М., Гогаев К. А., Подрезов Ю. М., Аскеров М. Г. Особливості бейнітного високоміцного чавуну з огляду виробництва швидкозношуваних змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – «ВПІ», Вінниця. 2017. №4(133). С. 81-87.
 20. Волощенко С. М., Гогаев К. А., Радченко О. К., Аскеров М. Г., Варченко В. Т. Дослідження властивостей високоміцного чавуну для лемешів в залежності від хімічного складу та режимів термообробки. *Збірник наук. праць. "Вісник Донбаської державної машинобудівної академії"*. Краматорськ. 2008. № 1 (11). С. 56-61.
 21. Гогаев К. О., Волощенко С. М., Подрезов Ю. М., Аскеров М. Г., Минаков М. В., Шуригин Б. В. Влияние температуры изотермического гартування на зміцнення високоміцних чавунів при деформації. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – «ВПІ», Вінниця. 2020. №4 (151). С. 113-119.
 22. Волощенко С. М., Гогаев К. О., Радченко О. К., Шейко А. И, Аскеров М. Г. Спосіб виготовлення модифікатора. Патент України №88530 від 26.10.09., опуб. 10.09.12. Бюл. № 9. –38 с.
 23. Волощенко С. М., Гогаев К. А., Радченко А. К. Комплексные модификаторы, изготавливаемые прокаткой порошковых смесей для железоуглеродистых сплавов. *Порошковая металлургия*. 2009. № ½. С. 128–133.
 24. Волощенко С. М., Ульшин В. И., Аскеров М. Г., Бега М. Д., Ульшин С. В. Термічна обробка лемешів із високоміцного чавуну. *Металознавство та обробка металів*. ФТІМС. 2009. № 4. С. 25 – 31.
 25. Волощенко С. М., Гогаев К. О., Радченко О. К., Аскеров М. Г. Дослідження властивостей високоміцного чавуну для лемешів в залежності від хімічного складу та режимів термічної обробки. *Темат. зб. наукових праць «Вісник Донецької державної машинобудівної академії»*. Краматорськ. 2008. №1 (11). С. 56–61.
 26. Волощенко С. М., Гогаев К. А. и др. Спосіб виготовлення змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки, Патент України №99797.

References (transliterated)

1. Vashchenko K. Y., Sofrony L. *Mahnyevii chuhun*. Kyev, Mashhyz, 1960. 485 p.
2. Vashchenko K. Y., Rudoi A. P. Poverkhnostnoe natiazhenye chuhuna. *Lyteinoe proyzvodstvo*, 1962, 6, pp. 24 – 27.
3. Voloshchenko M. V. *Termycheskaia obrabotka visokoprochnoho chuhuna*. Hostekhyzdat USSR. K., 1961. 97 p.

4. Bublykov V. B., Yasynskyi A. A., Siroporshnev L. N., Kozak D. S., Bachynskyi Yu. D. Vlyianyie sodержaniya kremnyia y skorosty okhlazhdeniia na obrazovanye otbela v otlyvkakh yz modyfytsirovannoho v kovshe visokoprochnoho chuhuna. *Protsessi lyttia*, 2009, 4, pp. 17-24.
5. Voloshchenko M. V., Lytovko V. Y., Zelenii B. H. Vlyianyie kremnyia na mekhanycheskye svoistva yzotermichesky zakalennoho chuhuna s sharovydnim hrafyotom. *Metallovedeniye y termicheskaiia obrabotka metallor*, 1964, 7, pp. 20 – 23.
6. Naidek V. L., Havryliuk V. P., Neyzhko Y. H. *Beinytnii visokoprochnii chuhun*. K., 2008. 140 p.
7. Adel Nofal. Advances in the Metallurgy and Applications of ADI. *Journal of Metallurgical Engineering (ME)*, 2013, Vol. 2, Issue 1, pp. 1-18.
8. Mohammad Baba Zadeh, Hamid Pour Asiabi. Wear Characteristics of ADIs: A Comprehensive Review on Mechanisms and Effective Parameters. *J. Basic. Appl. Sci. Res.*, 2013, 3(2), pp. 646-656.
9. Gogaev K., Podrezov Y., Voloshchenko S., Askerov M., Minakov N., Lugovskoy Y. Analysis of strain hardening of ADI at isothermal hardening temperatures. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 1 (3), pp. 3–8, doi:10.20998/2413-4295.2020.03.01.
10. Harding R. A. The production, properties and automotive applications of austempered ductile iron. *Metals and Materials*, 2007, 45(1), pp. 1–16.
11. Brezina R., Filipek J., Šenberger J. Application of ductile iron in the manufacture of ploughshares. *Res. Agr. Eng.*, 2004 (2), 50, pp. 75–80.
12. Voloshchenko S. M., Gogaev K. A., Askerov M. G., Mirapolsky A. M. Application of high-strength bainitic cast iron for the production of replaceable parts of soil-cultivating agricultural machinery. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, 32 (1254), 14–18, doi:10.20998/2413-4295.2017.32.02.
13. Voloshchenko S., Gogaev K., Podrezov Yu., Askerov M., Mirapolsky A. Possibilities of import substitution of replaceable parts for soil-cultivating agricultural machinery by parts from high-strength bainitic cast iron. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 1, 14–19, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.02.
14. Gogaev K. O., Podrezov Yu. N., Voloshchenko S. M., Askerov M. H., Ulshyn V. Y., Beha M. D., Varchenko V. T., Radchenko O. K., Hrybkov V. K., Sydorchuk O. M. Vyznachennia skladu komponentiv modyfikatoriv dlia vysokomitsnogo chavunu z ferytnoi osnovoii, ta rozrobka tekhnolohichnykh parametriv vyhotovlenniia kompozytsiinykh modyfikatoriv prokatuvanniam. Vyhotovlenniia doslidnykh zrazkiv dlia vyznachennia mekhanichnykh vlastyvostei ta znosostiikosti. *Zvit pro n.-d. Robotu № derzhreiestratsii 0107U00143 IPM NAN Ukrainy*. Kyiv. 2007, 32 p.
15. Voloshchenko S. M., Gogaev K. O., Askerov M. H., Radchenko O. K., Evych Ya. Y. Yspolzovanye metoda prokatky dlia proyzvodstva kompleksnykh kompozytsyonnykh modyfykatorov. *Protsessi lyttia*, 2007, 5, pp. 41-44.
16. Gogaev K. O., Voloshchenko S. M., Askerov M. H. Yssledovanye y razrobka tekhnolohyy proyzvodstva yznosostoikykh lytykh detalei s yspolzovanyem kompozytsyonnykh kompleksnykh modyfykatorov yz poroshkovykh materialov, YPM NANU, Kyev, dekabr 2009.
17. Voloshchenko S. M., Ulshyn V. I., Ulshyn S. I., Askerov M. H., Beha M. D. Termichna obrobka lemshiv iz vysokomitsnogo chavunu. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, Kyiv. IPM NANU, IMNU, 04.2009.
18. Gogaev K. O., Voloshchenko S. M., Askerov M. H. Povishenye resursa ekspluatatsyy lemshov pry pakhotnykh rabotakh za schet yspolzovaniia visokoprochnoho beinytnoho chuhuna. *Tez. dokladov 6 Mezhdunarodnoi konferentsyy «Materyali y pokrytiia v ekstremalnikh uslovyiakh»*. 20-24.09.2010, Bolshaiia Ialta, Ponyzovka Ukrainy, p. 338.
19. Voloshchenko S. M., Gogaev K. O., Podrezov Yu. M., Askerov M. H. Osoblyvosti beinitnogo vysokomitsnogo chavunu z ohliadu vyrobnytstva shvydkoznoshuvanykh zminnykh detalei gruntoobrobnoi silhosptekhniki, *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu*. – «VPI», Vinnytsa, 2017, 4(133), pp. 81-87.
20. Voloshchenko S. M., Gogaev K. O., Radchenko O. K., Askerov M. H., Varchenko V. T. Doslidzhennia vlastyvostei vysoko-mitsnogo chavunu dlia lemshiv v zalezhnosti vid khimichnogo skladu ta rezhymiv termoobrobky, *Zbirnyk nauk. prats. "Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii"*. – Kramatorsk, 2008, 1 (11), pp. 56-61.
21. Gogaev K. O., Voloshchenko S. M., Podrezov Yu. M., Askerov M. H., Minakov M. V., Shuryhin B. V. Vplyv temperatury izotermichnogo hartuvanniia na zmitsnennia vysokomitsnykh chavuniv pry deformatsii, *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu*. – «VPI», Vinnytsa. 2020. 4(151). pp. 113-119.
22. Voloshchenko S. M., Gogaev K. O., Radchenko O. K., Sheiko A. Y., Askerov M. H. Sposib vyhotovlenniia modyfikatora. Patent Ukrainy №88530 vid 26.10.09., opub. 10.09.12. Biul. № 9. 38 p.
23. Voloshchenko S. M., Gogaev K. O., Radchenko A. K. Kompleksnie modyfykatori, yzgotavlyvaemie prokatkoi poroshkovykh smesei dlia zhelezouhlerodystykh splavov. *Poroshkovaia metallurhiia*, 2009, 1/2, pp. 128–133.
24. Voloshchenko S. M., Ulshyn V. I., Askerov M. H., Beha M. D., Ulshyn S. V. Termichna obrobka lemshiv iz vysokomitsnogo chavunu. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*. FTIMS, 2009, 4, pp. 25-31.
25. Voloshchenko S. M., Gogaev K. O., Radchenko O. K., Askerov M. H. Doslidzhennia vlastyvostei vysokomitsnogo chavunu dlia lemshchiv v zalezhnosti vid khimichnogo skladu ta rezhymiv termichnoi obrobky. *Temat. zb. naukovykh prats «Visnyk Donetskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii»*. – Kramatorsk, 2008, 1 (11), pp. 56–61.
26. Voloshchenko S. M., Gogaev K. O. I dr. Sposib vyhotovlenniia zminnykh detalei gruntoobrobnoi silhosptekhniki. Patent Ukrainy №99797.

Відомості про авторів (About authors)

Аскеров Мукафат Гейбат огли - кандидат технічних наук, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, старший науковий співробітник відділу №10 ІПМ НАН України, г. Київ, Україна; e-mail: mukafatask@gmail.com

Askerov Mukafat Geibat ogly -candidate of technical sciences, Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, senior researcher of the department №10 of IPM of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine; e-mail: mukafatask@gmail.com

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю таким чином:

Аскеров М. Г. Нові матеріали для виробництва змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. № 2 (8). С. 3-8. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.01.

Please refer to this article as follows:

Askerov M. G. New materials for the production of replaceable parts of tillage agricultural machinery. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 3-8, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.01.

Пожалуйста, ссылайтесь на статью следующим образом:

Аскеров М. Г. Новые материалы для производства сменных деталей почвообрабатывающей сельхозтехники. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 3-8. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.01.

АННОТАЦИЯ Представлен анализ результатов практического применения литых сменных деталей навесного почвообрабатывающих сельхозтехники при эксплуатации в ряде аграрных предприятий Полтавской области при обработке более 60 000 гектаров в течение нескольких лет. Приведены сравнительные данные ресурса деталей изготовленных из высокопрочного бейнитного чугуна и стальных серийных аналогов отечественного и зарубежного производства. Указанные преимущества способа изготовления методами литья по сравнению с традиционным способом изготовления методом штамповки. Данная технология позволяет легко вносить коррективы в конструкцию лап культиваторов тем самым обеспечивая новое качество обработки почвы и подрезание корневой системы сорняков, что устраняет необходимость применения гербицидов. В основу данной технологии положено применение композиционных комплексных модификаторов, изготавливаемых прокаткой порошковых смесей из пластических и хрупких компонентов при необходимом соблюдении пропорций их соотношения. Использование порошковых прокатных модификаторов обеспечивает необходимые свойства и структуру литого металла необходимые для проведения дальнейшей термической обработки. Обоснованно получения высокой износостойкости литых изделий благодаря появлению TRIP-эффекта и постоянного обновления износостойкого поверхностного слоя при работе.

Ключевые слова: композиционные комплексные модификаторы; высокопрочный бейнитный чугун; TRIP-эффект.

Надійшла (received) 30.04.2021

УДК 621.9.019

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.02

ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ КООРДИНОВАНИХ ОТВОРІВ МАЛОГО ДІАМЕТРУ, ВИГОТОВЛЕНИХ З НАПРАВЛЕННЯМ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

В. М. БУРДЕЙНА, Г. С. ГРІНЧЕНКО, С. М. АРТЮХ, А. Р. ТРИЩ

кафедра Охорони праці, стандартизації та сертифікації, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків, УКРАЇНА
*e-mail: hrinchenko@uipa.edu.ua

АНОТАЦІЯ Представлено розмірний аналіз вихідних параметрів координованих розмірів отворів. Розглядаються питання, пов'язані з оцінюванням точності розташування поверхонь глибоких отворів. Вивчаються вплив різних технологічних факторів на величину розсіювання координованих розмірів. Проведено експериментальні дослідження з використанням методики планування експерименту, для яких було використано зразки заготовок зі сталі 45, чавуну марки СЧ15, алюмінієвих сплавів. Дослідженню піддавалися такі фактори, як кут керніння, твердість оброблюваної заготовки, зусилля керніння та їх вплив на діаметр відбитка і його глибину. В результаті проведених експериментів виявлено незначний вплив зусилля керніння на діаметр та глибину відбитку. Разом з тим, виявлено, що кут керна призводить до прямо пропорційного збільшення діаметру відбитку та обернено пропорційно впливає на його глибину. Твердість матеріалу більш істотно впливає на діаметр відбитку, ніж на його глибину. Сумарний вплив керованих факторів значно впливає на діаметр відбитку. Запропоновано мінімальні кути свердла керніння для деяких матеріалів. Запропоновано математичну модель точності обробки координованих отворів на основі оцінювання коефіцієнтів рівняння регресії і знаходження шуканих математичних моделей полів розсіювання розмірів і відхилень. В якості факторів, що варіюються під час свердління координованих отворів, було взято: довжина кондукторної втулки, виліт інструмента, твердість оброблюваного матеріалу, діаметр інструмента. Виявлено, що зі збільшенням діаметра інструмента і довжини направляючої втулки зменшується величина розсіювання розмірів від бази і позиційних відхилень, а збільшення вильоту інструменту і підвищення фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу збільшують величину поля розсіювання розміру від бази та позиційне відхилення. Було введено додатковий фактор: зазор в поєднанні між ріжучим інструментом і кондукторною втулкою та отримано математичні залежності впливу факторів на точність розмірів при обробці глибоких отворів з напрямком ріжучого інструменту. Показано, що введення додаткового фактору – зазору, не змінило сутності процесу появи похибок на малих агрегатних верстатах, а зміна діаметрів не призводить до істотного збільшення полів розсіювання.

Ключові слова: наладка; ріжучий інструмент; координовані отвори; поля розсіювання

ESTIMATION OF ACCURACY OF COORDINATED SMALL DIAMETER HOLES WITH CUTTING TOOL DIRECTION

V. BURDEINAIA, H. HRINCHENKO, S. ARTIUKH, A. TRISHCH

Department of Labor Protection, Standardization and Certification, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The dimensional analysis of the initial parameters of the coordinated dimensions of the holes is presented. Issues related to the assessment of the accuracy of the location of the surfaces of deep holes are considered. The influence of various technological factors on the magnitude of scattering of coordinated dimensions is studied. Experimental studies using experimental design methodology, which was used for sample preparations 45 steel, cast iron SCH15, aluminum alloys. Factors such as the cutting angle, the hardness of the workpiece, the cutting force and their effect on the diameter of the impression and its depth were studied. As a result of the experiments, a slight effect of the drilling force on the diameter and depth of the impression was found. However, it was found that the angle of the core leads to a directly proportional increase in the diameter of the imprint and inversely affects its depth. The hardness of the material has a more significant effect on the diameter of the imprint than on its depth. The total influence of controlled factors significantly affects the diameter of the imprint. Minimum core drilling angles are proposed for some materials. A mathematical model of the accuracy of machining coordinated holes is proposed on the basis of estimating the coefficients of the regression equation and finding the required mathematical models of the scattering fields of dimensions and deviations. As factors that vary during the drilling of coordinated holes, were taken: the length of the conductor sleeve, the departure of the tool, the hardness of the workpiece, the diameter of the tool. It is found that with increasing tool diameter and guide sleeve length decreases the amount of dimensional scattering from the base and positional deviations, and increasing tool departure and improving the physical and mechanical properties of the workpiece increase the size of the size scattering field from the base and positional deviation. An additional factor was introduced: the gap in the combination between the cutting tool and the conductor sleeve and obtained mathematical dependences of the influence of factors on dimensional accuracy when machining deep holes with the direction of the cutting tool. It is shown that the introduction of an additional factor - the gap, did not change the essence of the process of errors on small aggregate machines, and the change in diameters does not lead to a significant increase in scattering fields.

Keywords: adjusting; cutting tools; coordinated holes; scattering field

Вступ

Під точністю обробки, в найбільш загальному вигляді, розуміють ступінь відповідності форми, розмірів і взаємного розташування оброблених

поверхонь деталей, відповідним характеристикам, які указані у конструкторській документації. Загальна похибка механічної обробки поверхонь деталі являється наслідком впливу ряду технологічних

факторів. Кожен технологічний фактор сприяє утворенню характерних первинних похибок, до числа яких відносяться: похибки механічної обробки, що виникають в результаті пружних деформацій технологічної системи під впливом зусиль різання; похибки установки оброблюваної заготовки на верстаті; похибки, що виникають в результаті деформації заготовки та інших елементів технологічної системи; похибки обробки, що викликані розмірним зносом різального інструменту; похибки налаштування верстата; похибки обробки, викликані впливом температурних деформацій і багато інших.

При виготовленні координованих отворів мірним інструментом на налагоджених верстатах існує важливий фактор, що впливає на точність механічної обробки – кількість налаштувань технологічної системи. У такому випадку застосовують агрегатні верстати з використанням багатошпиндельних силових головок, що дозволяє зменшувати похибки налаштування, але появляються похибки кінематичної системи верстата, які додаються до сумарної похибки механічної обробки. Точність виготовлення отворів мірним інструментом вивчали ряд науковців, які, в своїх роботах [1-7] вивчали методи мінімізації похибки механічної обробки за рахунок проведення розмірного аналізу всіх конструкторських рішень.

Мета роботи

Отвори – це поверхні деталей, які, у більшості випадків, обробляються мірним різальним інструментом. Мається на увазі інструментом, розмір якого співпадає з розміром отвору. Найбільшу частку в технологічних процесах виготовлення отворів займають технології: свердління, зенкування, протягування. У роботах [2,5] вивчались розрахунково-аналітичні методи оцінювання точності механічної обробки координованих отворів, але вивчались технології без застосування кондукторних втулок. Тому, метою роботи являється провести комплекс досліджень з оцінювання точності розташування отворів відносно базової поверхні і точності розташування отворів між собою (позиційні відхилення).

Виклад основного матеріалу

У загальному вигляді точність механічної обробки отворів на агрегатних верстатах представляють у вигляді функціональної залежності [3]:

$$\omega = f(l_i, d_i, HB) \quad (1)$$

де ω - поле розсіювання координованих розмірів, l_i – величина вильоту інструменту за торець шпинделя, мм; d_i - діаметр інструменту, мм; HB -

твердість матеріалу деталі, що визначає його фізико-механічні властивості, МПа.

Поле розсіювання координованих розмірів (ω) складається з поля розсіювання розміру між поверхнею отвору і базовою поверхнею (ω_B) і позиційним відхиленням осей оброблюваних отворів (ω_O).

Для визначення складових величини поля допуску застосовується метод планування експерименту. При цьому необхідно перевірити вплив геометричних параметрів інструменту та їх жорсткості на точність механічної обробки.

При проведенні експериментів застосовувались такі матеріали: сталь 45 (HB - 2000-2200 МПа); сірий чавуну СЧ15В (HB 1000 - 1200 МПа); алюмінієвий сплав АЛ9 (HB - 500 - 600 МПа) [4,9,10].

Для визначення регресійної моделі застосовували повний факторний експеримент (ПФЕ), при якому поєднуються фактори усіх рівнів. Згідно методики планування ПФЕ були визначені кодовані значення кожного фактора та здійснено перетворення з координатного простору факторів в координатний простір кодованих значень [5,11,12].

Дослідженню піддавалися наступні фактори: кут керніння (α) і твердість оброблюваної заготовки (HB). Досліджувався вплив зусилля керніння (P), кут керніння (α) і твердість матеріалу (HB) на діаметр ($d_{\text{відб}}$) відбитка і його глибину ($l_{\text{відб}}$).

Дослідження показали, що зусилля удару (P) надають незначний вплив як на величину $d_{\text{відб}}$, так і на величину $l_{\text{відб}}$ і становить від 21 до 13% відповідно. Кут керна прямо пропорційно впливає на збільшення $d_{\text{відб}}$ і його значення не перевищує 31%. Кут керна α впливає на глибину обернено пропорційно і становить - до 57%. Вплив твердості матеріалу теж істотний. Твердість матеріалу впливає на $d_{\text{відб}}$ (48%), а на його глибину (27%). Керовані фактори (P) і (α) впливають на $d_{\text{відб}}$ і становить до 57% і 72% відповідно [5,8].

Із результатів ПФЕ можна зробити висновок, що глибина керніння залежить від зусилля керніння і кута керна. Для різних матеріалів рекомендується такі оптимальні кути керніння:

- для алюмінієвих сплавів $\alpha_{\text{min}} = 60^\circ$;
- для сірого чавуну $\alpha_{\text{min}} = 60^\circ$;
- для сталі $\alpha_{\text{min}} = 70-75^\circ$.

Але, для якісного функціонування технологічного процесу і забезпечення якості координованих отворів важливо також забезпечити потрібний діаметр відбитка, що дозволить забезпечити орієнтацію інструменту під час операції свердління отворів.

Функціональна залежність зміни розсіювання розмірів від базової поверхні і відхилення осей отворів деталей при експериментальних дослідженнях можуть мати вигляд:

$$\omega_{B;O} = f(d_i, HB, l_{bm}, l_x), \quad (2)$$

де $\omega_{B;O}$ – величина поля розсіювання розміру від базової поверхні або позиційного відхилення отворів,

мкм; d_i – діаметр мірного інструменту (отвори); l_{BT} – довжина кондукторної втулки (направляючої частини), мм; l_x – величина вильоту інструменту за торець кондукторної втулки, мм.

Математичну модель точності обробки координованих отворів можливо отримати методом планування повного факторного експерименту типу 2^4 . При проведенні ПФЕ, кожна точка - це один досвід з визначення практичного поля розсіювання T_B або T_O . Для перевірки гіпотези однорідності дисперсій T_B або T_O в кожній точці плану експерименту застосовувався статистичний критерій Кохрена, який і показав їх однорідність.

Наступним кроком було оцінювання коефіцієнтів рівняння регресії і знаходження шуканих математичних моделей полів розсіювання розмірів і відхилень. Величини факторів, що варіюються під час свердління координованих отворів показані в табл. 1.

Зі збільшенням діаметра інструмента d_i довжини направляючої втулки l_{BT} зменшується величина розсіювання розмірів від бази (В) і позиційних відхилень (О). Збільшення розміру вильоту інструменту та підвищення фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу збільшують значення ω_B та ω_O .

$$\lg \omega_B = 1,9431 - 0,0018 \lg d_i + 0,337 \lg HB - 0,187 \lg l_{BT} + 0,196 \lg l_x \quad (3)$$

$$\lg \omega_O = 3,066 - 0,04137 \lg d_i + 0,1531 \lg HB - 0,1165 \lg l_{BT} + 0,12 \lg l_x \quad (4)$$

Таблиця 1 - Варіювання факторів при свердлінні координованих отворів з напрямком ріжучого інструменту

Рівень варіювання	Незалежні фактори та їх логарифми							
	Довжина кондукторної втулки		Виліт інструмента		Твердість оброблюваного матеріалу		Діаметр інструмента	
	l_{BT} , мм	$\lg l_{BT}$	l_x , мм	$\lg l_x$	HB, МПа	$\lg HB$	d_i , мм	$\lg d_i$
Верхній (1)	18	1,26	3,5	0,5	1940	3,29	3,0	0,5
Нульовий (0)	13	1,09	2,5	0,4	1230	3,1	2,0	0,3
Нижній (-1)	7	0,85	1,5	0,18	570	2,7	1,0	0
Інтервал варіювання	-	0,21	-	0,18	-	0,3	-	0,24

Математичні залежності полів розсіювання можна отримати, методом потенціювання рівняння (3) та (4). В результаті потенціювання отримуємо такі залежності полів розсіювання при виготовленні

отворів методом з направленням ріжучого інструменту:

$$\omega_B = 19,6 \frac{l_x^{0,2} HB^{0,34}}{d_i^{0,02} l_{BT}^{0,19}} \quad (5)$$

$$\omega_O = 19,6 \frac{l_x^{0,12} HB^{0,15}}{d_i^{0,04} l_{BT}^{0,12}} 10^3 \quad (6)$$

Залежності (5) та (6) можна рекомендувати для розрахунку полів розсіювання в технологічних процесах з застосуванням кондукторних втулок. При цьому повинні виконуватись такі умови:

- довжина кондукторних втулок повинна знаходитись в діапазоні від 5мм до 20мм;
- величина вильоту інструменту за торець втулки в діапазоні від 1 мм до 5 мм;
- величина діаметрів в діапазоні $0,5\text{мм} \leq d_i \leq 3,5\text{мм}$;
- твердість оброблюваного матеріалу в діапазоні $500 \text{ МПа} \leq HB \leq 2500 \text{ МПа}$.

Обговорення результатів

В агрегатних верстатах середнього габариту [6] конструктивно-технологічні характеристики силових головок і технологічної оснастки практично рівнозначні з характеристиками верстатів мінімального розміру. Тому, прийнявши зазор в поєднанні між ріжучим інструментом і кондукторною втулкою для малих агрегатних верстатів $T_{S1 \min} = 10$ мкм; $T_{S1 \max} = 40$ мкм; $T_{S1} / 2 = 25$ мкм, а його питомий вплив для $\omega_B = 24\%$ і $\omega_O = 40\%$, розрахуємо емпіричні залежності з урахуванням впливу зазначеного зазору.

При збільшенні величин зазору S_1 і вильоту інструменту l_x збільшуються поля розсіювання, а застосування кондукторних втулок, навпаки зменшує поля розсіювання. В табл. 2 представлено результати впливу факторів на точність обробки координованих отворів. Сумарний вплив керованих факторів (l_{BT} , l_x і T_{S1}) істотно впливає на величини полів розсіювання координованих розмірів і становить відповідно 56% і 65%, що дає можливість регулювання технологічного процесу для отримання точності обробки координованих отворів на малих агрегатних верстатах.

Визначимо залежності позиційних відхилень для агрегатних верстатів в логарифмічному вигляді:

$$\omega_B = 1,534 - 0,025 \lg d_i + 0,357 \lg HB - 0,185 \lg l_{BT} + 0,206 \lg l_x + 0,202 \lg T_{S1} \quad (7)$$

$$\omega_O = 2,71 - 0,041 \lg d_i + 0,153 \lg HB - 0,117 \lg l_{BT} + 0,066 \lg l_x + 0,198 \lg T_{S1} \quad (8)$$

Потенціюючи вирази (7) і (8), отримаємо залежності для розрахунку полів розсіювання:

$$\omega_B = 34,2 \frac{T_{S1}^{0,2} l_x^{0,2} HB^{0,36}}{d_i^{0,03} l_{BT}^{0,19}} \quad (9)$$

$$\omega_O = 34,2 \frac{T_{S1}^{0,3} l_x^{0,07} HB^{0,15}}{d_i^{0,04} l_{BT}^{0,12}} \quad (10)$$

Таблиця 2 - Результати впливу керуючих факторів на величину полів розсіювання ω_0 і ω_B під час свердління з напрямком ріжучого інструменту

Точнісні характеристики	Питома вага факторів,%				
	керованих			некерованих	
	геометричні		точнісні	Задані кресленням	
	I_{BT}	I_X	T_{S1}	НВ	d_i
Розмір від бази до осі отвору обробки	16	16	25	39	4
Позиційне відхилення осі отвору	16	8	40	29	7

Порівнюючи показники ступенів математичних моделей в формулах (5) і (6), при змінюваних факторах I_X , НВ, I_{BT} і d_i з результатами, отриманими в імітаційних моделях (9) і (10) можна встановити, що дуже схожі між собою і, практично, співпадають. Отже введення в модель додаткового фактора, як зазору T_{S1} не вплинуло на величини полів розсіювання координованих розмірів при виготовленні отворів на малих агрегатних верстатах. Також дослідження показали, що на величину полів розсіювання координованих отворів не значною мірою впливає фактор діаметру інструменту.

Висновки

В результаті проведених досліджень з планування експерименту отримані такі результати та можна зробити наступні висновки:

- поєднання двох керованих чинників, як мінімальна (T_{S1min}) та максимальна довжина направляючої частини кондукторної втулки (I_{BT1max}) дають можливість зменшити поля розсіювання координованих розмірів ω_B в 1,6 рази, а ω_0 - в 2,6 рази;

- мінімальний виліт I_X між торцем кондукторної втулки і поверхнею оброблюваної деталі може зменшити розсіювання координованих розмірів при сприятливому поєднанні керованих факторів (T_{S1min} , I_{BT1max} , I_{Xmin}) в порівнянні з несприятливим їх поєднанням (T_{S1max} , I_{BT1min} , I_{Xmax}) від 1,85 рази для ω_B і до 2,7 разів для ω_0 ;

- поєднання чинників, що визначають зазор в поєднанні інструмент - отвір втулки при T_{S1min} , і I_{BTmax} збільшує точність отворів в 1,6 рази для ω_B і 2,6 рази для ω_0 в порівнянні з використанням втулок з T_{S1max} , I_{BT1min} .

Список літератури

1. Carlos G. *Analysis and Design of Marine Structures*. New York : CRC Press, 2009. 321 p.

2. Бурдейная В. М., Пашченко Э. А. Точность координированных размеров при обработке отверстий без направления режущего инструмента. *Машинобудування*. 2013. №12. С. 125–129.
3. Бурдейна В. М., Артиух С. М. Забезпечення точності обробки координованих отворів в системах без напрямку ріжучого інструменту. *Машинобудування*. 2020. № 25. С. 99-106. doi: 10.32820/2079-1747-2020-25-99-106.
4. Бурдейна В. М., Артиух С. М. Основні особливості оптимізації показників якості розмірів координованих отворів при різних видах обробки. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Серія : Нові рішення в сучасних технологіях*. 2018. № 16 (1292). С. 16-21. doi: 10.20998/2413-4295.2018.16.03.
5. Cong W. L., Xiatian Z., Deines T. W. Rotary ultrasonic machining of carbon fiber reinforced plastic composites: An experimental study on cutting temperature. *Journal of reinforced plastics and composites*. 2012. 22. 31. P. 1516-1525. doi: 10.1177/0731684412464913.
6. Livia Dana Beju, Brîndaşu P. D. A generalized approach of the holder systems for cutting tools. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*. 2011. No. 9(2). P. 12-17.
7. Klocke F., Brumm M., Staudt J. Quality and surface of gears manufactured by free form milling with standard tools. *International Gear Conference, Lyon, France, 2014*, 26–28. doi: 10.1533/9781782421955.506.
8. Biermann D., Bathe T., Rautert C. Core Drilling of Fiber Reinforced Materials using Abrasive Tools. *CIRP*, 2017. № 66, P. 175-180. doi: 10.1016/j.procir.2017.03.304.
9. Gaizka Gómez Escudero, Pablo Fernández De Lucio, Haizea Gonzalez, Michael Bartoň. Definition of tailor made cutting tools for machining of complex surfaces based on final surface shape. *2020 International Conference on Mathematics and Computers in Science and Engineering (MACISE)*, 2020. doi: 10.1109/MACISE49704.2020.00031.
10. Hongqi Liu, Hai Lin, Xinyong Mao, Bin Li. Surface roughness optimal estimation for disc parts turning using Gaussian-process-based Bayesian combined model. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2018. P. 203-210. doi: 10.1177/0954406218809116.
11. İynen Oğur, Şahinoğlu Abidin, Özdemir Mustafa, Yılmaz Volkan. Investigation of the Effect of Cutting Parameters on the Surface Roughness Value in the Machining of AISI 4140 Steel with Taquchi Method. *Journal of the Institute of Science and Technology*. 2020. №10(4). P. 2840-2849. doi: 10.21597/jist.736802.
12. Aladwani A. N., Mohamed S. S., Khalil T. A., Gaafer A. M. Effect Of Cutting Tool Coating And Cutting Parameters On Surface Quality And Material Removal Rate In Turning Of Stainless Steel 304. *Engineering Research Journal*. 2019. Vol. 1, No. 39, P. 32-38.

References(transliterated)

1. Carlos G. *Analysis and Design of Marine Structures*. New York. CRC Press, 2009. 321 p.
2. Burdeinaia V. M., Pashchenko E. A. Tochnost koordynirovannykh razmerov pry obrabotke otverstiy bez napravleniya rezhushcheho ynstumenta. *Mashynobuduvannia*, 2013, 12, pp. 125–129.
3. Burdeina V. M., Artiukh S. M. Zabezpechennia tochnosti obrobky koordynovanykh otvoriv v systemakh bez napriamku rizhuchoho instrumentu. *Mashynobuduvannia*,

- 2020, 25, pp. 99-106, doi:10.32820/2079-1747-2020-25-99-106.
4. Burdeina V., Artyuh S. The main features of optimizing the sizes of coordinated holes for different types of processing. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 16 (1292), 16-21, doi: 10.20998/2413-4295.2018.16.03.
 5. Cong W. L., Xiatian Z., Deines T. W. Rotary ultrasonic machining of carbon fiber reinforced plastic composites: An experimental study on cutting temperature. *Journal of reinforced plastics and composites*, 2012, 22, 31, pp. 1516-1525, doi: 10.1177/0731684412464913.
 6. Livia Dana Beju, Brîndașu P. D. A generalized approach of the holder systems for cutting tools. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2011, 9(2), pp. 12-17.
 7. Klocke F., Brumm M., Staudt J. Quality and surface of gears manufactured by free form milling with standard tools. *International Gear Conference, Lyon, France*, 2014, pp. 26–28, doi: 10.1533/9781782421955.506.
 8. Biermann D., Bathe T., Rautert C. Core Drilling of Fiber Reinforced Materials using Abrasive Tools. *CIRP*, 2017, 66, pp. 175-180, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.304.
 9. Gaizka Gómez Escudero, Pablo Fernández De Lucio, Haizea Gonzalez, Michael Bartoň. Definition of tailor made cutting tools for machining of complex surfaces based on final surface shape. *2020 International Conference on Mathematics and Computers in Science and Engineering (MACISE)*, 2020, doi: 10.1109/MACISE49704.2020.00031.
 10. Hongqi Liu, Hai Lin, Xinyong Mao, Bin Li. Surface roughness optimal estimation for disc parts turning using Gaussian-process-based Bayesian combined model. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2018, pp. 203-210, doi: 10.1177/0954406218809116.
 11. İynen Oğur, Şahinoğlu Abidin, Özdemir Mustafa, Yılmaz Volkan. Investigation of the Effect of Cutting Parameters on the Surface Roughness Value in the Machining of AISI 4140 Steel with Tauchi Method. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2020, 10(4), pp. 2840-2849, doi: 10.21597/jist.736802.
 12. Aladwani A .N., Mohamed S. S., Khalil T. A., Gaafer A. M. Effect Of Cutting Tool Coating And Cutting Parameters On Surface Quality And Material Removal Rate In Turning Of Stainless Steel 304. *Engineering Research Journal*, 2019, 1, 39, pp. 32-38.

Відомості про авторів (About authors)

Бурдейна Вікторія Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри Охорони праці, стандартизації та сертифікації; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-0026-1900; e-mail: zamorskavika@ukr.net

Vykoryia Burdeina – Scientific Degree (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Labour Protection, Standardization and Certification Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 000-0002-0026-1900; e-mail: zamorskavika@ukr.net

Грінченко Ганна Сергіївна– кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри Охорони праці, стандартизації та сертифікації; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6498-6142; e-mail: hrinchenko@uipa.edu.ua

Hanna Hrinchenko – Scientific Degree (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Labour Protection, Standardization and Certification Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6498-6142; e-mail: hrinchenko@uipa.edu.ua

Артюх Світлана Миколаївна– кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри Охорони праці, стандартизації та сертифікації; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-0804-6313; e-mail: artyhsn@gmail.com

Svitlan Artiukh a– Scientific Degree (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Labour Protection, Standardization and Certification Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0804-6313; e-mail: artyhsn@gmail.com

Трищ Андрій Романович– Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри Охорони праці, стандартизації та сертифікації; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-0012-4690; e-mail: trich_@ukr.net

Andrii Trishch – graduate student, Department of Labour Protection, Standardization and Certification Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-0012-4690; e-mail: trich_@ukr.net

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Бурдейна В. М., Грінченко Г. С., Артюх С. М., Трищ А. Р. Оцінювання точності координованих отворів малого діаметру, виготовлених з направленням різального інструменту. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 9-14. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.021.

Please cite this article as:

Burdeina V., Hrinchenko H., Artiukh S., Trishch A. Estimation of accuracy of coordinated small diameter holes with cutting tool direction. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 9-14, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.021.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Бурдейная В. М., Гринченко А. С., Артюх С. Н., Трищ А. Р. Оценка точности координированных отверстий малого диаметра изготовленных с направлением режущего инструмента. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 9-14. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.02.

АННОТАЦИЯ В статье представлены размерный анализ исходных параметров координированных размеров отверстий. Рассматриваются вопросы, связанные с оценкой точности расположения поверхностей глубоких отверстий. Изучаются влияние различных технологических факторов на величину рассеивания координированных размеров. Проведены экспериментальные исследования с использованием методики планирования эксперимента, для которых были использованы образцы заготовок из стали 45, чугуна марки СЧ15, алюминиевых сплавов. Исследованию подвергались такие факторы, как угол кернения, твердость обрабатываемой заготовки, усилия кернения и их влияние на диаметр отпечатка и его глубину. В результате проведенных экспериментов выявлено незначительное влияние усилия кернения на диаметр и глубину отпечатка. Вместе с тем, установлено, что угол керна приводит к прямо пропорциональному увеличению диаметра отпечатка и обратно пропорционально влияет на его глубину. Твердость материала более существенно влияет на диаметр отпечатка, чем на его глубину. Суммарное влияние управляемых факторов оказывает значительное влияние на диаметр отпечатка. Предложено минимальные углы сверла кернения для некоторых материалов. Предложена математическая модель точности обработки координированных отверстий на основе оценки коэффициентов уравнения регрессии и нахождения искомым математических моделей полей рассеяния размеров и отклонений. В качестве факторов, варьируемых при сверлении координированных отверстий, были взяты: длина кондукторной втулки, вылет инструмента, твердость обрабатываемого материала, диаметр инструмента. Выявлено, что с увеличением диаметра инструмента и длины направляющей втулки уменьшается величина рассеивания размеров от базы и позиционных отклонений, а увеличение вылета инструмента и повышения физико-механических свойств обрабатываемого материала увеличивают величину поля рассеяния размера от базы и позиционное отклонение. Было введено дополнительный фактор: зазор в сочетании между режущим инструментом и кондукторной втулкой и получены математические зависимости влияния факторов на точность размеров при обработке глубоких отверстий с направлением режущего инструмента. Показано, что введение дополнительного фактора - зазора, не изменило сущности процесса появления погрешностей на малых агрегатных станках, а изменение диаметра не приводит к существенному увеличению полей рассеяния.

Ключевые слова: наладка; режущий инструмент; координированные отверстия; поля рассеяния.

Надійшла (received) 02.05.2021

УДК 621.316.9

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.03

РОЗВИТОК, КОНСТРУЮВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Є. В. ГОНЧАРОВ^{1*}, Н. В. КРЮКОВА¹, С. О. ВЕТВИЦЬКА², В. С. МАРКОВ¹,
І. В. ПОЛЯКОВ¹

¹ кафедра загальної електротехніки, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

² кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: e.goncharov.v@gmail.com

АНОТАЦІЯ У статті проведено огляд методів із вдосконалення технологій моніторингу та обстеження стану електромереж. Проаналізовано стан розвитку з конструювання та методів використання безпілотних літальних апаратів, які призначені до обслуговування ліній електропередачі. Розглянуто низку питань зі створення концепції безпілотних літальних апаратів з високою підйомною здатністю, що дозволяє їх застосувати для різних засобів призначення з обслуговування ліній електромереж, а це в свою чергу зменшує капітальні витрати. Безпілотні літальні апарати набувають все більшого використання комунальними підприємствами, що знижує ризики та вартість обслуговування у порівнянні з іншими системами моніторингу ліній електропередачі. Визначено, що в галузі електроенергетики найбільш перспективним з методів контролю ліній електропередачі є застосування безпілотних літальних апаратів сумісно з використанням сучасного вимірювального обладнання і цифрових технологій. Зроблено висновки, що вагомою перевагою використання безпілотних літальних апаратів є їх транспортна прохідність, яка зменшує витрати та підвищує ефективність їх використання, як засіб з визначення перспективних місць для розташування вітроелектростанцій. Відзначено, що з переходом світової електроенергетичної галузі на використання безпілотних літальних апаратів буде забезпечено ресурсозбереження і зменшені витрати. Більш того, визначено, що використання безпілотних літальних апаратів з високою підйомною здатністю дозволяє мінімізувати витрати на використання додаткової підйомної техніки та технічного персоналу. Зокрема, безпілотні літальні апарати з високою підйомною здатністю, що використовують вогнемети, можуть ефективно усувати такі перешкоди, як засмічення на лініях електропередачі. Відмічається, що за рахунок використання безпілотних літальних апаратів підвищиться безпека праці співробітників з обслуговування електроенергетичних об'єктів та ліній електромережі. Отримані результати з аналізу технічного стану використання безпілотних літальних апаратів вказують на перспективність впровадження систем віддаленого контролю та моніторингу експлуатаційного стану ліній електропередачі.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; ліній електропередач; коротке замикання; обмежувач струму; потужність; енергоефективність

DEVELOPMENT, DESIGN AND APPLICATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR POWER LINES

Ye. HONCHAROV¹, N. KRIUKOVA¹, S. VIETVYTSKA², V. MARKOV¹, I. POLIAKOV¹

¹ Department of Applied Electrical Engineering, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

² Department of Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The article reviews the methods for improving the technology of monitoring and inspection of the state of power grids. The state of development in the design and methods of using unmanned aerial vehicles, which are intended for servicing power lines, is analyzed. A number of issues related to the concept of unmanned aerial vehicles with high lifting capacity are considered, which allows them to be used for various means of maintenance of power lines, which in turn reduces capital costs. Unmanned aerial vehicles are increasingly being used by utilities, which reduces the risks and costs of maintenance compared to other transmission line monitoring systems. It was determined that in the field of electric power industry the most promising of the methods for monitoring power lines is the application of unmanned aerial vehicles together with the use of modern measuring equipment and digital technologies. It is concluded that a significant advantage of the use of unmanned aerial vehicles is their possibility, which reduces costs and increases the efficiency of their use as a means of determining promising locations for wind farms. It is noted that with the transition of the global electricity industry to the use of unmanned aerial vehicles will save resources and reduce costs. Moreover, it is determined that the use of unmanned aerial vehicles with high lifting capacity allows minimizing the cost of using additional lifting equipment and technical personnel. In particular, high-lift unmanned aerial vehicles using flamethrowers can effectively remove obstacles such as clogging on power lines. It is noted that the use of unmanned aerial vehicles will increase the safety of employees in the maintenance of power facilities and power lines. The obtained results from the analysis of the technical

condition of the use of unmanned aerial vehicles indicate the prospects for the introduction of remote control systems and monitoring of the operational condition of power lines.

Keywords: unmanned aerial vehicle; power line; short circuit; current limiter; power; energy efficiency

Вступ

При експлуатації ліній електропередач (ЛЕП) можуть виникнути аварійні ситуації, що потребують своєчасного виявлення, а також їхнього усунення. Найбільшого розвитку, щодо вирішення задач з обслуговування ЛЕП, набув віддалений контроль електроенергетичних об'єктів [1,2].

Вирішення вказаних питань потребує використання сучасних технічних рішень та інформаційно-вимірювальних технологій, що потребує застосування вимірювальних апаратно-програмних комплексів [3].

Завдяки розробленню систем моніторингу ЛЕП було запропоновано метод віддаленого контролю за допомогою використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). На основі цієї технології пізніше було розроблено методи з обслуговування ЛЕП, що забезпечують більшу безпеку при виконанні технічних робіт.

Мета статті

Метою статті є аналіз стану розвитку конструювання та використання безпілотних літальних апаратів для ліній електропередач. Задача роботи – порівняння наявних систем моніторингу стану ліній електропередач з методом, заснованим на використанні безпілотних літальних апаратів.

Аналіз наявних методів

Так, наприклад, у США останнім часом загострилася проблема виникнення природних пожеж на значних територіях різних штатів. Одна із головних причин виникнення пожеж, окрім природних умов, є аварійні режими роботи та короткі замикання у лініях електромереж.

Для забезпечення обмеження струмів короткого замикання використовуються струмообмежувальні реактори. Обмежувачі струму короткого замикання вмикаються у частину електромережі, що передбачає захист від аварійних струмів. Такий пристрій характеризується низьким опором у номінальному режимі, а у струмообмежувальних ректорах з надпровідними струмонесучими елементами опір відсутній. Вмикання струмообмежувачів у певні вузли енергосистеми дозволить продовжити строк роботи комутаційної апаратури. У індукційних обмежувачах струму також використовуються магнітопроводи [4].

Тоді при короткому замиканні номінальна напруга буде дорівнювати спаду напруги на обмежувачі струму:

$$U_n = X_L I_{k3} = 4,44 f w B_{k3} S_{oc} .$$

При зростанні аварійного струму магнітна індукція у осерді B_{k3} не повинна опинитися у насиченні:

$$B_{k3} = (0,8 \dots 0,85) B_{max} .$$

Відповідно, площа перерізу осердя реактора:

$$S_{oc} = \frac{U_n}{4,44 f w B_{k3}} ,$$

де S_{oc} – площа перерізу осердя; B_{k3} – магнітна індукція сталі осердя обмежувача при короткому замиканні; w – кількість витків; f – частота коливань напруги.

Як приклад, компанія PG & E проводить як поточне обслуговування, так і додаткові перевірки інфраструктури електропостачання з використанням квадрокоптерів (рис. 1) навколо округів Гумбольдт і Мендосіно [5,6]. Комунальна компанія готується до інспектування усіх ліній електропередачі в зонах ризику природних пожеж Рівня 3 і однієї третини ліній у зонах ризику Рівня 2.



Рис. 1 – Перевірка інфраструктури електропостачання за допомогою БПЛА

Програма перевірки системи прискорює цикли перевірок, виходячи за рамки нормативних вимог, щоб забезпечити відповідність ризику лісових пожеж. Це одна з багатьох ініціатив, зроблених PG & E для захисту безпеки і надійності електромережі, поряд з іншими заходами, включаючи поліпшене керування рослинністю і зміцнення енергосистеми.

Компанія PG & E обстежує понад 24000 км своїх електричних ліній, використовуючи моделі квадрокоптерів, такі як Inspire, Mavic та Matrice. При цьому перевіряються всі компоненти, включаючи траверси, ізолятори і опори, а також важливі електричні компоненти та обладнання. Також документуються отримані дані за допомогою зображень з високою роздільною здатністю, які аналізуються спеціальними групами з технічного обслуговування, проектування, будівництва систем й

планування їх моніторингу для оцінки виявлених недоліків. При цьому також задіяні БПЛА з тепловізором для контролю стану сонячних модулів (рис. 2).



Рис. 2 – Контроль стану сонячних модулів за допомогою БПЛА

Встановлений на БПЛА тепловізор дозволяє виявити теплові аномалії на поверхні модулів. Як правило, їхня наявність вказує на можливі несправності або пошкодження обладнання.

Отримавши відповідні дані, персонал електростанції виїжджає до проблемної ділянки. Найчастіше це може бути трава й об'єкти природного походження. Іноді потрібно більш серйозне втручання, аж до заміни модулів з ушкодженнями, що утворилися, наприклад, після удару блискавки.

Також БПЛА з тепловізором допомагають контролювати стан обладнання вузлів підстанцій 110 кВ (відкриті розподільні пристрої), силові трансформатори, громовідводи, вежі освітлення, ділянки повітряних ліній в зоні експлуатаційної відповідальності [7].

Крім того, за допомогою групи БПЛА можна:

- обрати місце для встановлення «ферм вітру»;

- підбрати оптимальні місця для установки вітроелектрогенераторів не тільки на суші, а й на воді (рис. 3).



Рис. 3 – Вибір оптимального місця для установки вітроелектрогенераторів

Ефективність використання вітроелектрогенераторів значною мірою залежить від правильного вибору місць для їхньої установки [8,9].

Від застосування БПЛА очікується отримати чималий економічний ефект.

Розрахунок «ферм вітру» ускладнений тим, що необхідно враховувати вплив одних вітроелектрогенераторів на інші, в індивідуальних і унікальних для кожного географічного району умовах. Неправильно розташований вітроелектрогенератор здатний зменшити ефективність найближчих енергосистем на 40 % і навіть суттєво прискорити їхнє зношення.

Таким чином, «фермерам вітру» доводиться враховувати наступні моменти:

- вітроелектрогенератори не можна ставити занадто близько один до одного (впаде ефективність, прискориться знос);

- вітроелектрогенератори не можна ставити занадто далеко один від одного (істотно зросте вартість кабелів).

Традиційно, проблему вирішують за допомогою комп'ютерного моделювання, але такий підхід не дуже добре враховує особливості місця встановлення.

Команда дослідників з Швейцарської вищої технічної школи в Цюріху розробила БПЛА з комплексом сенсорів, що дозволяють збирати дані про рельєф місцевості та повітряні потоки. Така інформація дозволяє провести моделювання з розміщення вітроелектрогенераторів, що близьке до оптимуму.

Наступний крок – розробка групи малих БПЛА, здатної проводити одночасні виміри на великій площі, що прискорить проведення досліджень [10,11].

Для очищення високовольтних проводів використовують БПЛА з вогнеметом. Якщо на лінію електропередач потрапило сміття, вживають наступні дії – доверху посилають спеціально навчену людину, знеструмлюючи на час лінію.

У Китаї (м. Сан'ян) пішли іншим шляхом, скориставшись можливостями БПЛА з вогнеметами [12]. БПЛА спалюють сміття (наприклад пластикові пакети) та інші об'єкти у важкодоступних місцях залпами з вогнемета (рис. 4). Раніше доводилося знімати фахівцям, яких піднімали до проводів за допомогою автовишки з телескопічним або важільно-телескопічним підйомником. Мова йде про квадрокоптер DJI S1000+ (вантажопідйомністю близько 11 кг).

БПЛА для інспекції різноманітних об'єктів. Латвійська компанія Aeropes також займається розробкою потужних квадрокоптерів: апаратів з 28 моторами і 16 батареями, здатних піднімати вантажі вагою до 181 кг. Нова ідея полягає у використанні потужних БПЛА для очищення лопатей вітроелектрогенераторів від бруду в США, Іспанії, Туреччині й в країнах Південної Америки, і від льоду в Канаді, Скандинавії та Європі.



Рис. 4 – Очищення високовольтних мереж за допомогою БПЛА з вогнеметом

Розробники мають намір адаптувати ці квадрокоптери для очищення лопатей вітроелектрогенераторів – від бруду у теплих країнах, й від льоду у холодних. Квадрокоптери можуть працювати, отримуючи живлення з землі (рис. 5), або в автономному режимі.



Рис. 5 – Очищення БПЛА лопатей вітроелектрогенераторів

В останньому випадку час автономного польоту складе не більше 12 хвилин. Отже поява все більш потужних електричних БПЛА кожного разу супроводжується низкою міркувань експертів, щодо потенціалу їх застосування.

Висновки

Завдяки недорогому використанню та простоті експлуатації БПЛА стали незамінним методом перевірки технічного стану ліній електропередачі [13, 14]. БПЛА все більше використовують у комунальній галузі, завдяки зниженій вартості та меншим ризикам.

Більш того, сталий стан у напрямку з конструювання БПЛА великої потужності забезпечив їх використання не тільки як засобів моніторингу, а й для технічного обслуговування ліній електропередачі.

Порівняно з іншими системами моніторингу ліній електропередачі відзначено розширення можливостей з функціоналу обладнання БПЛА. Таким чином, визначено тенденцію зі збільшення галузей застосування квадрокоптерів як при обстеженні, так і проектуванні електроенергосистем.

Список літератури

- Honcharov Y. V., Polyakov I. V., Markov V. S., Kriukova N. V. Consideration of Appliance Superconductors in Inductive Short Circuit Current Limiter. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2020. P. 339–342. doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250125.
- PG&E Uses Drones to Check Infrastructure Affected by Northern California Wildfires. URL: <https://www.tdworl.com/overhead-transmission/article/20970394/pge-uses-drones-to-check-infrastructure-affected-by-northern-california-wildfires>. (дата звернення: 03.03.2021).
- Беспилотник с тепловизором задействовали для контроля состояния солнечных модулей. URL: <http://robotrends.ru/pub/2033/besplotnik-s-teplovizorom-zadyaystvovali-dlya-kontrolya-sostoyaniya-solnechnyh-modulyay> (дата звернення: 03.12.2020).
- Дроны выберут место для “ферм ветра” будущего. URL: <http://robotrends.ru/pub/1648/drony-vyberut-mesto-dlya-ferm-ventra-budushego> (дата звернення: 03.03.2021).
- Беспилотники и тушение пожаров. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Беспилотный-летательный-аппарат-\(дрон,-БПЛА\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Беспилотный-летательный-аппарат-(дрон,-БПЛА)) (дата звернення: 03.03.2021).
- PG&E to conduct electrical inspections with helicopters and drones in Mendocino and Humboldt this month. URL: <https://mendovoice.com/2020/05/pge-to-conduct-electrical-inspections-with-helicopters-and-drones-in-mendocino-and-humboldt-this-month/> (дата звернення: 03.03.2021).
- Гончаров С. В., Поляков І. В., Марков В. С., та ін. Перспективи сучасних методів дистанційного контролю ліній електропередачі. *Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2020. № 2(4). С. 145–151. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.19.
- Kryukova N. V., Goncharov E. V., Polyakov I. V. Modern Monitoring Systems of Electric Power Lines. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції. Ч. 2 (16–18 травня 2018 р., Харків)*. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. С. 86.
- Сокол Е. И., Резинкина М. М., Гриб О. Г. и др. Методика комплексного автоматизированного мониторинга объектов энергетической системы Украины с целью повышения безопасности ее функционирования. *Электротехника і Електромеханіка*. 2016. № 2. С. 65–69. doi:10.20998/2074-272X.2016.2.12.
- Junfeng L., Min L., Qinruo W. A Novel Insulator Detection Method for Aerial Images. *Proceedings of the 9th International Conference on Automation Engineering (ICCAE), Sydney, Australia, 18–21 February 2017*. 141–144. doi:10.1145/3057039.3057065
- Yang T. W., Yin H., Ruan Q. Q., Han J., Qi J. T., Yong Q., Wang Z. T., Sun Z. Q. Overhead Power Line Detection from UAV Video Images. *Proceedings of the 19th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP), Auckland, New Zealand, 28–30 November 2012*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6484570&isnumber=6484553> (дата звернення: 03.03.2021).
- Correa A. C., Mondragon I. F., Ortiz F. A. P. Towards visual based navigation with power line detection. *Advances in Visual Computing, ISVC 2014, Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2014. Vol. 8887. P. 827–836.

13. Han B., Wang X. Learning for Tower Detection of Power Line Inspection. *DEStech Trans. Comput. Sci. Eng.* 2017. P. 216–220. doi: 10.12783/DTCSE/ICCAE2016/7194
 14. Zuo D., Hu H., Qian R., Liu Z. An insulator defect detection algorithm based on computer vision. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), Macau, China, 18–20 July 2017.* P. 361–365. doi: 10.1109/ICInfA.2017.8078934.
- References (transliterated)**
1. Honcharov Y. V., Polyakov I. V., Markov V. S., Kriukova N. V. Consideration of Appliance Superconductors in Inductive Short Circuit Current Limiter. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2020, pp. 339–342, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250125.
 2. PG&E Uses Drones to Check Infrastructure Affected by Northern California Wildfires. Available at: <https://www.tdworld.com/overhead-transmission/article/20970394/pge-uses-drones-to-check-infrastructure-affected-by-northern-california-wildfires> (accessed 03.03.2021).
 3. A drone with a thermal imager was used to monitor the status of solar modules. Available at: <http://robotrends.ru/pub/2033/bespilotnik-s-teplovizorom-zadyaystvovali-dlya-kontrolya-sostoyaniya-solnechnyh-modulyay> (accessed 03.12.2020).
 4. Drones will choose the location for the "wind farms" of the future. Available at: <http://robotrends.ru/pub/1648/dronyy-vyberut-mesto-dlya-ferm-vetra-budushego> (accessed 03.03.2021).
 5. Drones and firefighting. Available at: [https://www.tadviser.ru/index.php/Беспилотный_летательный_аппарат_\(дрон,_БПЛА\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Беспилотный_летательный_аппарат_(дрон,_БПЛА)) (accessed 03.03.2021)
 6. PG&E to conduct electrical inspections with helicopters and drones in Mendocino and Humboldt this month. Available at: <https://mendovoice.com/2020/05/pge-to-conduct-electrical-inspections-with-helicopters-and-drones-in-mendocino-and-humboldt-this-month/> (accessed 03.03.2021).
 7. Honcharov Ye., Polyakov I., Markov V., Kryukova N., Boykov D., Skrebtsov N. Prospects of Modern Remote Methods Control of Power Transmission Lines. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*, 2020, no. 2(4), pp. 145–151, doi:10.20998/2413-4295.2020.02.19.
 8. Kryukova N. V., Goncharov E. V., Polyakov I. V. Modern Monitoring Systems of Electric Power Lines. *Informatsiyi tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya. Tezy dopovidey XXVI mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi. Ch. 1 (16–18 travnya 2018, Kharkiv)* [Information technology: science, engineering, technology, education, health. Abstracts of the XXVI Int. Sci.-Pract. Conf. Part 1 (16–18 May 2018, Kharkov)]. Kharkiv, 2018, p. 86.
 9. Sokol E. I., Rezinkina M. M., Gryb O. G. and [et al.] A method of complex automated monitoring of Ukrainian power energy system objects to increase its operation safety. *Electrical engineering & Electromechanics*, 2016, no. 2, pp. 65–69, doi:10.20998/2074-272X.2016.2.12.
 10. Junfeng L., Min L., Qinruo W. A Novel Insulator Detection Method for Aerial Images. *Proceedings of the 9th International Conference on Automation Engineering (ICAE), Sydney, Australia, 18–21 February 2017*, pp. 141–144, doi:10.1145/3057039.3057065
 11. Yang T. W., Yin H., Ruan Q. Q., Han J., Qi J. T., Yong Q., Wang Z. T., Sun Z. Q. Overhead Power Line Detection from UAV Video Images. *Proceedings of the 19th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP), Auckland, New Zealand, 28–30 November 2012*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6484570&isnumber=6484553> (accessed 03.03.2021).
 12. Correa A. C., Mondragon I. F., Ortiz F. A. P. Towards visual based navigation with power line detection. *Advances in Visual Computing, ISVC 2014, Springer 2014, Vol. 8887*, pp. 827–836.
 13. Han B., Wang X. Learning for Tower Detection of Power Line Inspection. *DEStech Trans. Comput. Sci. Eng.* 2017, pp. 216–220, doi: 10.12783/DTCSE/ICCAE2016/7194.
 14. Zuo D., Hu H., Qian R., Liu Z. An insulator defect detection algorithm based on computer vision. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), Macau, China, 18–20 July 2017*, pp. 361–365, doi: 10.1109/ICInfA.2017.8078934.

Відомості про авторів (About the Authors)

Гончаров Євген Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-1924-8906; e-mail: e.goncharov.v@gmail.com.

Yevhen Honcharov – Candidate of Engineering Science (Ph.D.), associate professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", associate professor at the Department of Applied Electrical Engineering, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1924-8906; e-mail: e.goncharov.v@gmail.com

Крюкова Наталія Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-4600-1159.

Nataliia Kriukova – Candidate of Engineering Science (Ph.D.), Associate Professor, Department of Applied Electrical Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4600-1159.

Вствицька Соф'я Олександрівна – студентка бакалаврата, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, м. Харків, Україна.

Sofia Vietvytska – bachelor student, Department Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

Марков Владислав Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-0703-0918.

Vladyslav Markov – Candidate of Engineering Science (Ph. D.), associate professor, associate professor at the Department of Applied Electrical Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0703-0918.

Поляков Ігор Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-9329-1705.

Ihor Poliakov – Candidate of Engineering Science (Ph.D.), associate professor, associate professor at the Department of Applied Electrical Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-9329-1705.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Гончаров С. В., Крюкова Н. В., Вітвицька С. О., Марков В. С., Поляков І. В. Розвиток, конструювання та використання безпілотних літальних апаратів для ліній електропередач. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 15-20. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.03.

Please cite this article as:

Honcharov Ye., Kryukova N., Vietvytska S., Markov V., Polyakov I. Development, design and application of unmanned aerial vehicles for power lines. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 15-20, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.03.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Гончаров Е. В., Крюкова Н. В., Ветвицкая С. А., Марков В. С., Поляков И. В. Развитие, конструирование и применение беспилотных летательных аппаратов для линий электропередач. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серія: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 15-20. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.03.

АННОТАЦИЯ В статье проведен обзор методов по совершенствованию технологий мониторинга и обследования состояния электросетей. Проанализировано состояние развития конструирования и методов использования беспилотных летательных аппаратов, которые предназначены для обслуживания линий электропередачи. Рассмотрен ряд вопросов по созданию концепции беспилотных летательных аппаратов с высокой подъемной способностью, что позволяет их использовать для различных средств назначения по обслуживанию линий электропередач, а это в свою очередь уменьшает капитальные затраты. Беспилотные летательные аппараты приобретают все большее использование коммунальными предприятиями, снижает риски и стоимость обслуживания по сравнению с другими системами мониторинга линий электропередачи. Определено, что в области электроэнергетики наиболее перспективным из методов контроля линий электропередачи является применение беспилотных летательных аппаратов совместно с использованием современного измерительного оборудования и цифровых технологий. Сделаны выводы, что весомым преимуществом использования беспилотных летательных аппаратов является их транспортная проходимость, что уменьшает затраты и повышает эффективность их использования, как средство по определению перспективных мест для размещения ветроэлектростанций. Отмечено, что с переходом мировой электроэнергетической отрасли на использование беспилотных летательных аппаратов будет обеспечено ресурсосбережение и уменьшенные расходы. Более того, определено, что использование беспилотных летательных аппаратов с высокой подъемной способностью позволяет минимизировать затраты на использование дополнительной подъемной техники и технического персонала. В частности, беспилотные летательные аппараты с высокой подъемной способностью используют огнеметы, могут эффективно устранять препятствия, как засорение на линиях электропередачи. Отмечается, что за счет использования беспилотных летательных аппаратов повысится безопасность труда сотрудников по обслуживанию электроэнергетических объектов и линий электропередачи. Полученные результаты по анализу технического состояния использования беспилотных летательных аппаратов указывают на перспективность внедрения систем удаленного контроля и мониторинга эксплуатационного состояния линий электропередачи.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; линия электропередач; короткое замыкание; ограничитель тока; мощность; энергоэффективность

Надійшла (received) 22.04.2021

УДК 621.316

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.04

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ НА РИНКУ ДОПОМІЖНИХ ПОСЛУГ ОБ'ЄДНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

П. Д. ЛЕЖНЮК*, С. В. КРАВЧУК, Ю. В. МАЛОГУЛКО, І. О. ПРОКОПЕНКО

кафедра електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, УКРАЇНА
*e-mail: lezhpd@gmail.com

АНОТАЦІЯ Впровадження систем накопичення та подальшого переносу електроенергії досить важлива задача, що вирішується у різних країнах по різному, виходячи з типів продуктів, що можуть надаватись системами накопичення енергії. Аналіз структури генерувальних потужностей в Об'єднаній електроенергетичній системі України показує значний дефіцит маневрових потужностей, серед яких на сьогодні є тепла генерація, що має значний рівень зношеності основного генеруючого обладнання та гідроелектростанції. Виходячи з вищенаведеного логічного було б припустити, що з запуском нової моделі ринку електроенергії, будуть сформовані такі сегменти ринку, на яких цінові сигнали стануть привабливими для інвестицій в нові маневрові потужності. Проте, на сьогоднішній день формування таких сигналів, обмежено встановленням верхніх цінових індексів на балансуємому та ринку на добу наперед. Отже, для моделювання роботи систем накопичення енергії, був обраний ринок допоміжних послуг, на якому системний оператор закуповує послуги у постачальників допоміжних послуг. Моделювання роботи систем накопичення енергії для надання допоміжних послуг задача багатокритеріальна, що враховує як технічні особливості роботи системи накопичення енергії, так і відповідні цінові індекси, що були сформовані для кожного виду послуги. У роботі розглянута можливість надання послуг з автоматичного резерву відновлення частоти та надання послуг балансування. На основі статистичних даних по роботі ринку допоміжних послуг об'єднаної електроенергетичної системи України розроблено математичну модель, що дозволяє оцінити ефект від використання систем накопичення енергії, для надання послуг з первинного, вторинного та третинного регулювання частоти. Визначено взаємозв'язки між ціновими індексами на ринку допоміжних послуг та техніко-економічними характеристиками роботи системи накопичення енергії. Запропонована в математичній моделі роботи системи накопичення енергії цільова функція, що враховує приведені витрати на накопичення одиниці електроенергії, витрат на обслуговування та отримання доходу від надання послуг на ринку допоміжних послуг.

Ключові слова: ринок допоміжних послуг; система накопичення енергії; резерв підтримки частоти; резерв відновлення частоти

MATHEMATICAL MODELING OF BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS IN THE ADDITIONAL SERVICE MARKET OF THE UNITED ELECTRIC POWER SYSTEM OF UKRAINE

P. LEZHNIUK, S. KRAVCHUK, Y. MALOGULKO, I. PROKOPENKO

Department of the power plants and systems, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, UKRAINE

ABSTRACT The introduction of battery energy storage systems and the subsequent transfer of electricity is a very important task, which is solved in different countries in different ways, based on the types of products that can be provided by battery energy storage systems. The analysis of the structure of generating capacities in the United Electric Power System of Ukraine shows a significant deficit of shunting capacities, among which today there is thermal generation, which has a significant level of wear of the main generating equipment and hydroelectric power plants. Based on the above, it would be logical to assume that with the launch of a new model of the electricity market; market segments will be formed in which price signals will be attractive for investment in new shunting capacity. However, the formation of such signals is limited by the establishment of upper price indices on the additional service market and market day ahead. Thus, to simulate the operation of battery energy storage systems, the additional service market was chosen in which the system operator purchases services from additional service providers. Modeling the operation of battery energy storage systems for the provision of additional services is a multi-criteria task that takes into account both the technical features of the battery energy storage systems and the relevant price indices that have been formed for each type of service. The paper considers the possibility of providing services from the automatic reserve of frequency recovery and the provision of balancing services. Based on statistical data on the additional service market of the integrated power system of Ukraine, developed a mathematical model to assess the effect of the use of battery energy storage systems to provide services for primary, secondary and tertiary frequency control. The relationship between the price indices of additional service market and technical and economic characteristics of the battery energy storage system are determined. The target function is offered in the mathematical model of operation of the battery energy storage systems, which takes into account the reduced costs for the accumulation of a unit of electricity, maintenance costs and income from the provision of services on the additional service market.

Keywords: additional service market; battery energy storage system; frequency support reserve; frequency recovery reserve

Вступ

Значний приріст генерування відновлювальних джерел енергії (далі – ВДЕ), що значно залежить від мінливих погодних умов, а також значний ступінь

старіння основного генеруючого обладнання теплових електростанцій (далі – ТЕС) змушує фахівців галузі переглянути структуру генерувальних потужностей [1].

Висока заповненість графіка навантаження об'єднаної електроенергетичної системи України (далі – ОЕС України), базовою генерацією атомних електростанцій (далі – АЕС), при поступовому зменшенню обсягів генерації гідроелектростанцій та гідроаккумуляцій електростанцій (далі – ГЕС та ГАЕС відповідно), змушує фахівців галузі переглянути структуру генерувальних потужностей енергосистеми України.

Впровадження нової моделі ринку електроенергії, дало змогу поділити товар (електроенергію) на певні продукти, що надаються на різних сегментах ринку, які мають різну ціну в залежності від затребуваності в конкретну годину [2,3]. Від уміння керувати власним джерелом генерування чи споживання значним чином залежить фінансовий результат роботи на ринку [4–7].

Так у дослідженні [8], відмічено, що на сьогоднішній день для забезпечення операційної безпеки роботи енергосистеми необхідно запровадити щонайменше 400 МВт «гнучких» генерувальних потужностей. Як наслідок, Оператор системи передачі (далі – ОСП), запровадив низку аукціонів з закупівлі резервів потужності для первинного, вторинного та третинного регулювання частоти.

Оператор системи передачі визначає обсяги послуг та продуктів на ринку допоміжних послуг (далі – РДП), що необхідні для стабільної роботи електроенергетичної системи. Закон України про ринок електроенергії визначає 5 основних продуктів, що можуть торгуватись на РДП [9,10], зокрема:

з регулювання частоти та активної потужності в ОЕС України:

– резерв підтримки частоти (РПЧ). Процес підтримки частоти полягає в утриманні частоти та зменшенні відхилень частоти від номінального значення незалежно від причини та місця виникнення небалансу в синхронній зоні, за рахунок активації резервів підтримки частоти;

– резерв відновлення частоти (РВЧ). Процес відновлення частоти полягає у поверненні частоти до номінального значення при одночасному поверненні міждержавних обмінів до планових значень (при синхронній роботі з енергосистемами інших держав) шляхом зведення помилки області регулювання до нуля протягом часу відновлення частоти (не більше 15 хвилин), а також у відновленні активованого РПЧ шляхом активації резервів відновлення частоти. Час введення в дію (повної активації) РВЧ не більше 15 хвилин; стійка видача РВЧ не менше 60 хвилин;

– резерв заміщення (РЗ). Для підтримання заданих величин РПЧ і РВЧ та відновлення цих резервів у разі їх використання в процесі регулювання частоти в ОЕС України/блоці регулювання/синхронній області має здійснюватися процес заміщення резервів і створюватися резерви заміщення. Час введення в дію (повної активації) РЗ не більше 30 хвилин; стійка видача РЗ не обмежується у часі.

з підтримання параметрів надійності та якості електричної енергії в ОЕС України:

– послуга з регулювання напруги та реактивної потужності. Метою Регулювання напруги та реактивної потужності в режимі синхронного компенсатора (СК) є підтримка рівнів напруги в контрольних точках системи передачі у визначених КСП допустимих межах з метою підтримання стійкості та безпеки енергосистеми (області регулювання) шляхом забезпечення та використання резерву реактивної потужності генеруючих одиниць, здатних переходити в режим СК;

– послуга із забезпечення відновлення функціонування ОЕС України після системних аварій. Метою послуги є можливість пуску одиниці генерації в умовах відсутності напруги в зовнішній мережі та електричне розташування в мережі, що дозволяє здійснити передачу виробленої енергії на власні потреби АЕС (ТЕС) з урахуванням втрат електричної енергії в мережі, а також наявність одиниці генерації у плані відновлення «ОЕС України»/«острову Бурштинської ТЕС» після особливої системної аварії (та/або регіональних планах відновлення).

Потенційно, одним з основних учасників на РДП в частині постачальників послуг з регулювання частоти та активної потужності в ОЕС України можуть бути оператори системи накопичення енергії (далі – СНЕ).

Проте, на сьогоднішній день нормативними актами не врегульоване питання приєднання електроустановок такого типу до мереж операторів систем, а також відсутнє визначення – система накопичення енергії. В рамках цієї статті, посилаючись на Проект Закону про внесення змін до Закону України «Про ринок електричної енергії» (щодо енергетичної безпеки, балансування енергосистеми та системи накопичення енергії), розуміємо, що:

– система накопичення енергії – технологічний комплекс, приєднаний до системи передачі чи розподілу з метою відбору, накопичення, у тому числі шляхом перетворення (фізичні, інерційні, хімічні, водневі та інші технології) раніше виробленої електричної енергії, її зберігання та подальшого відпуску;

– оператор системи накопичення енергії – суб'єкт господарювання, який використовує систему накопичення електричної енергії для купівлі-продажу електричної енергії на ринку електричної енергії, та надає допоміжні послуги і є відповідальним за безпечну експлуатацію та технічне обслуговування такої системи накопичення енергії.

Таким, чином, на сьогоднішній день, для реалізації нового суб'єкта на ринку електроенергії – оператора системи накопичення, актуальною є задача розробки математичної моделі роботи СНЕ на ринку. Дана задача є техніко-економічною, що повинна враховувати зміну ціни на ринку допоміжних послуг ОЕС України та визначати такий графік роботи СНЕ

на ринку, що принесе максимальну рентабельність його власнику та мінімізує штрафні санкції при невідповідності виконання команд диспетчера ОСП.

Мета роботи

Метою статті є розробка математичної моделі роботи системи накопичення енергії на ринку допоміжних послуг, що забезпечить максимальну рентабельність роботи системи накопичення енергії.

Виклад основного матеріалу

Відповідно до положень Закону України «Про ринок електричної енергії» ст. 8 господарська діяльність із виробництва, передачі, розподілу електричної енергії, постачання електричної енергії споживачу, трейдерська діяльність, здійснення функцій оператора ринку та гарантованого покупця проводиться на ринку електричної енергії за умови отримання відповідної ліцензії.

Пунктом 1.6 Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з виробництва електричної енергії, затверджених постановою НКРЕКП від 27 грудня 2017 р. № 1467 (далі – Ліцензійні умови) передбачено, щодо заяви про отримання ліцензії здобувачем ліцензії надається, зокрема відомість про місце та засоби провадження господарської діяльності з виробництва електричної енергії.

При цьому, згідно із пунктом 1.4. Ліцензійних умов:

– електрогенеруюче обладнання – комплекс функціонально взаємопов'язаного устаткування, що здійснює виробництво електричної енергії та складається з одного або більшої кількості генераторів чи іншого обладнання, що використовується для перетворення енергетичних ресурсів будь-якого походження на електричну енергію;

– засоби провадження господарської діяльності – електрогенеруюче обладнання, розташоване на об'єкті електроенергетики, та інше функціонально взаємопов'язане з ним устаткування і споруди що призначаються для виробництва електричної енергії.

Також слід зазначити, що система накопичення енергії є електрохімічною системою, в яких реалізуються функції накопичувачів електричної енергії. Системи накопичення енергії, як джерело електричної енергії застосовують в пристроях, апаратах або системах, дія яких заснована на автономному принципі функціонування, тобто незалежно від наявності у безпосередньої близькості електричної мережі. В акумуляторах під час зарядки електрична енергія перетворюється в хімічну і система знаходиться в рівновазі доти, доки між електродами протікає навіть дуже малий струм. При підключенні контактів системи накопичення енергії до споживача електричної енергії (елементу з кінцевим електричним опором) відбувається зворотний процес: хімічна енергія перетворюється в

електричну – при цьому частина її перетворюється в тепло.

Таким чином, особливості систем накопичення енергії є те, що в залежності від режиму роботи, вона може бути, як споживачем електричної енергії так і здійснювати відпуск електричної енергії в мережу, а отже однозначно віднести систему накопичення енергії до генеруючої одиниці не вбачається можливим.

Враховуючи зазначене, Законом України «Про ринок електричної енергії» діяльність пов'язана із накопиченням, зберіганням та подальшою реалізацією електричної енергії системи накопичення електричної енергії чітко не визначена. Відповідно до діючих Ліцензійних умов, ліцензування господарської діяльності системи накопичення електричної енергії не передбачено. Крім цього, згідно Кодексів систем розподілу та передачі затверджених постановами НКРЕКП від 14.03.2018 р. № 309 та № 310 надання оператором системи розподілу, або передачі послуг з приєднання до електричних мереж системи накопичення енергії не передбачена, що, в свою чергу, унеможливує діяльність таких систем на ринку електричної енергії та надання відповідних послуг.

Законодавче забезпечення впровадження систем накопичення електричної енергії має здійснюватися з дотриманням принципів європейської політики та законодавства. Так, при прийнятті у грудні 2018 р. Загальних рекомендацій щодо політики цілей на 2030 рік для Договірних Сторін Енергетичного Співтовариства, однією з яких є Україна, Радою Міністрів Енергетичного Співтовариства анонсовано початок роботи щодо включення актів 4-го Енергетичного пакету законодавства ЄС (Clean Energy Package) до складу законодавства Енергетичного Співтовариства (Energy Community acquis), що стане обов'язковим для транспозиції та імплементації Договірними Сторонами.

Директива (ЄС) 2019/944 Європейського Парламенту та Ради від 05 червня 2019 року щодо спільних правил внутрішнього ринку електричної енергії (далі – Директива), що входить до складу Clean Energy Package, визначає основні вимоги щодо розвитку та участі систем накопичення на ринку електричної енергії.

Математична модель роботи СНЕ на організованих сегментах ринку

З урахуванням положень Директиви ключовим при опрацюванні питання законодавчого забезпечення впровадження систем накопичення електричної енергії: беззастережне дотримання ринкових принципів розвитку та участі систем накопичення електричної енергії на ринку електричної енергії, уникнення створення для таких систем необґрунтованих економічних та регуляторних переваг.

Цільова функція має бути спрямована на досягнення максимального прибутку за звітній період. Загальний прибуток в загальному складається з доходів та витрат та формується таким чином, щоб визначити оптимальні умови роботи СНЕ при різних сценаріях формування ціни на послуги, що надаються:

$$P_{sum.pr} = \left(\sum_s p_s \sum_t \left(R_{s(t)}^{PDH} + R_{s(t)}^{PDP} - C_t^{dP} - C_t^{DOD} \right) - C^{OM} \right) \rightarrow \max \quad (1)$$

де p_s – імовірність виникнення сценарію s з відповідною ціною на послуги СНЕ; $R_{s(t)}^{PDH}$ – дохід від надання послуг на РДН у сценарії s в годину t ; $R_{s(t)}^{PDP}$ – дохід від надання послуг на РДП у сценарії s в годину t ; C_t^{dP} – вартість задіяння накопичувача на РДН/ВДР та РДП; C_t^{DOD} – вартість деградації накопичувача при допустимій глибині розряду та нижче допустимого рівня; C^{OM} – витрати на сервісне обслуговування.

Таким чином, оператор системи накопичення може заздалегідь передбачити низку сценаріїв s ринкової ціни та оцінювати різні ймовірності виникнення таких сценаріїв p_s , використовуючи дані попередніх та поточного розрахункового періоду t . Такий підхід дає можливість прогнозувати техніко-економічні показники роботи системи накопичення енергії.

Дохід від реалізації електроенергії на ринку на добу наперед або внутрішньодобовому ринку $R_{s(t)}^{PDH}$ досягається за рахунок закупівлі електроенергії в нічний час доби, коли ринок має профіцит генерації (тобто ціна низька) та реалізації в денний час доби коли ціна висока. Ще одним джерелом надходження є надання послуг РДП $R_{s(t)}^{PDP}$, що позначають дохід від реалізації послуг з первинного, вторинного та третинного регулювання відповідного сценарію s за годину t , відповідно.

Витратна частина (1) складається з вартості задіяння накопичувача на РДН/ВДР та РДП – C_t^{dP} при наданні відповідних послуг, вартості деградації накопичувача при допустимій глибині розряду та нижче допустимого рівня C_t^{DOD} , а також витрат на сервісне обслуговування – C^{OM} .

Доходи з реалізації послуг на РДП та РДН визначаються за формулами 2 та 3 відповідно.

$$R_{s(t)}^{PDH} = p_{s(t)} W_{s(t)} \Delta t \quad (2)$$

де $p_{s(t)}$ – ймовірність виникнення сценарію s ; $W_{s(t)}$ – фінансовий результат з купівлі-продажу електроенергії на ринку в часовий проміжок Δt .

$$R_{s(t)}^{PDP} = b_t^{reg} + R_{s(t)}^{redPDP} \quad (3)$$

$$b_t^{reg} = p_{s(t)} w_{s(t)}^{PDP} P_{s(t)}^{PDP} \quad (4)$$

де $w_{s(t)}^{PDP}$ – загальний обсяг електроенергії, що продається/купується на ринку допоміжних послуг; $P_{s(t)}^{PDP}$ – ціна електроенергії на РДП у сценарії s в годину t ; $R_{s(t)}^{redPDP}$ – плата за готовність надання послуги на ринку допоміжних послуг; b_t^{reg} – плата за обсяг електроенергії, що був реалізований на ринку допоміжних послуг.

Вартість задіяння потужностей СНЕ на ринках на РДН/ВДР та РДП C_t^{dP} при наданні відповідних послуг, що пропорційна обсягу електроенергії, яка була використана накопичувачем (як в режимі заряду так і розряду), згідно (5).

$$C_t^{dP} = C_{op} \left[(b_t^{e.sell} + b_t^{e.buy}) \Delta t \right] \quad (5)$$

де C_{op} – ціна задіяння СНЕ при купівлі-продажу одиниці електроенергії; $b_t^{e.sell}$ – електроенергія, що була продана на ринку електроенергії за проміжок часу Δt ; $b_t^{e.buy}$ – електроенергія, що була куплена на ринку електроенергії за проміжок часу Δt .

Вартість, що враховує погіршення стану v -того накопичувача, яким керує оператор розподіленого СНЕ – C_t^{DOD} , визначається відповідно до виразів (6-9):

$$Y_{v(t)} = p_{v(t)}^{reg} / \eta_v^{dsg} \quad (6)$$

$$\sigma_{v(t)} = p_{v(t)}^{reg} \eta_v^{chg} \quad (7)$$

$$C_t^{DOD} = \sum_{v \in V} \epsilon_{v(t)}^{DOD} \quad (8)$$

$$C_{v(t)}^{DOD} = \frac{C_{v(t)}^{CHE} \left| \frac{M_{v(t)}}{100} \left[\sum_{t \in T} \left(P_{v(t)}^{e.dsg} \Delta t + p_{v(t)}^{e.chg} \Delta t + \right) \right] \right|}{E_v} \quad (9)$$

де E_v – повна ємність СНЕ, кВт*год; η_v^{dsg} та η_v^{chg} – ефективність заряду та розряду v -того накопичувача, відповідно; $p_{v(t)}^{reg}$ – команда на регулювання (розряду/заряду) в період t ; $p_{v(t)}^{e.dsg}$ – потужність при якій за час t v -тий СНЕ повністю розрядиться; $p_{v(t)}^{e.chg}$ – потужність при якій за час t v -тий СНЕ повністю зарядиться; $\sigma_{v(t)}$ – обсяг електроенергії, відповідно до команди на розвантаження, яким заряджають v -тий СНЕ, в період часового ряду t ; $Y_{v(t)}$ – обсяг електроенергії, відповідно до команди на завантаження, яким розряджають v -тий СНЕ, в період часового ряду t ; $C_{v(t)}^{CHE}$ – вартість v -того накопичувача, що враховує рівень його деградації – $M_{v(t)}$.

Вартість сервісного обслуговування v -того СНЕ C^{OM} залежить від ціни обслуговування одиниці

потужності СНЕ та сумарної потужності розподілених СНЕ – P_{\max} визначаються як

$$C^{OM} = c_{om} P_{\max}, \quad (10)$$

$$P_{\max} = \sum_{v \in V} P_{v,\max}$$

де c_{om} – ціна обслуговування одиниці потужності СНЕ, грн; $P_{v,\max}$ – номінальна потужність v -того накопичувача.

Загальна ціна за електроенергію визначається проданою та купленою електроенергією, що проілюстровано у виразі (11). v -тий накопичувач протягом певного періоду часового ряду t не можна одночасно заряджати та розряджати, отже $p_{v(t)}^{e.dsg}$ та $p_{v(t)}^{e.chg}$ не можуть обидва бути позитивними. Однак, через те, що існує багато розподілених СНЕ, технічно можливо, щоб оператор системи накопичення продавав і купував електроенергію одночасно, при умові що за певний період часового ряду t , одна частина накопичувачів буде заряджатись, а інша – розряджатись. В оптимальному варіанті загальна ціна на електроенергію повинна розподілитися між

накопичувачами, як показано в (12) та (13). Загальний обсяг торгів на РДП наведено в (14).

$$W_{s(t)} = b_t^{e.sell} - b_t^{e.buy} \quad (11)$$

$$b_t^{e.sell} = \sum_{v \in V} p_{v(t)}^{e.dsg} \eta_v^{dsg} \quad (12)$$

$$b_t^{e.buy} = \sum_{v \in V} p_{v(t)}^{e.chg} / \eta_v^{chg} \quad (13)$$

$$b_t^{reg} = \sum_{v \in V} p_{v(t)}^{reg} \quad (14)$$

Модельовання роботи СНЕ на РДП

При приєднанні СНЕ до мереж ОСР та участі в балансуєчому ринку та ринку допоміжних послуг основне використання потужностей оператора СНЕ буде спрямовано на надання симетричної послуги аРВЧ 80%. Дане співвідношення прийнято з урахуванням технічних характеристик акумуляторів на основі LiFePO4 для них глибина розряду (Depth of Discharge, DOD) приймається на рівні 80%, що забезпечує оптимальну кількість циклів.

Загальний принцип балансування збурень ОС з використанням ДП наведено на рис. 1

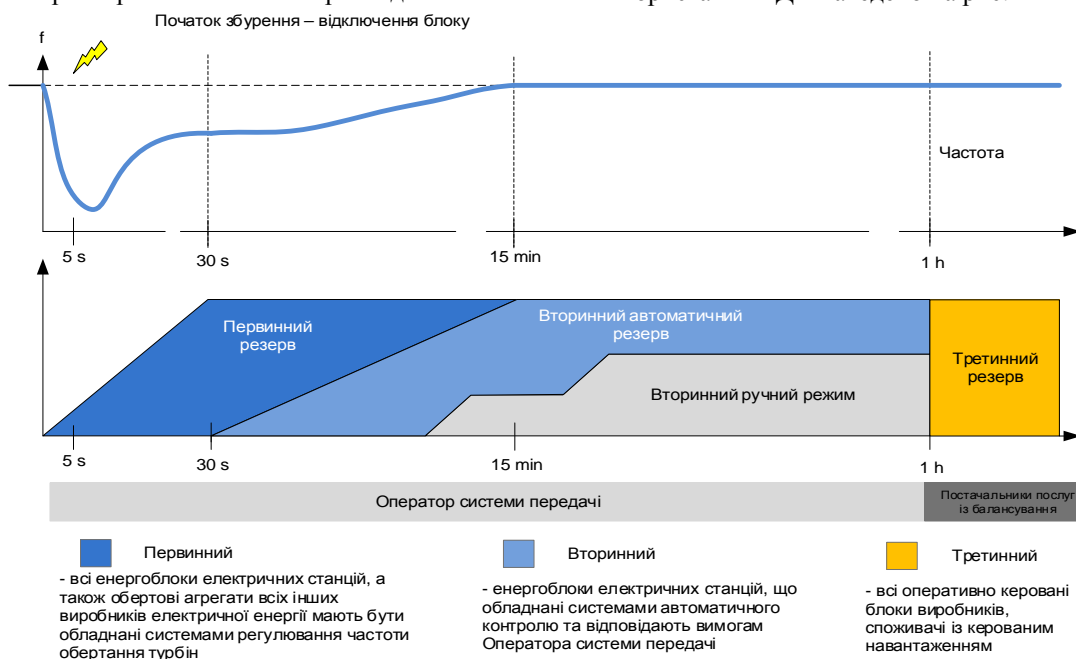


Рис. 1 – Принцип балансування збурень системи з використанням різних видів резервів

На сьогоднішній день на сайті НЕК «Укренерго» опубліковано аналіз роботи ринку електроенергії за серпень 2020 р. На рис. 2 наведено результати роботи РДП. В ОЕС України закупівля резервів підтримки частоти (РПЧ) в середньому 21 МВт на одну годину. Закупівля аРВЧ (автоматичних резервів відновлення частоти) протягом місяця була

волатильною через недостатній рівень пропозицій учасників даного ринку. В середньому, аРВЧ на завантаження було закуплено 31% – 71% від аукціонної потреби (у середньому 53%), на розвантаження – від 10% до 95% (в середньому – 58%) [11].

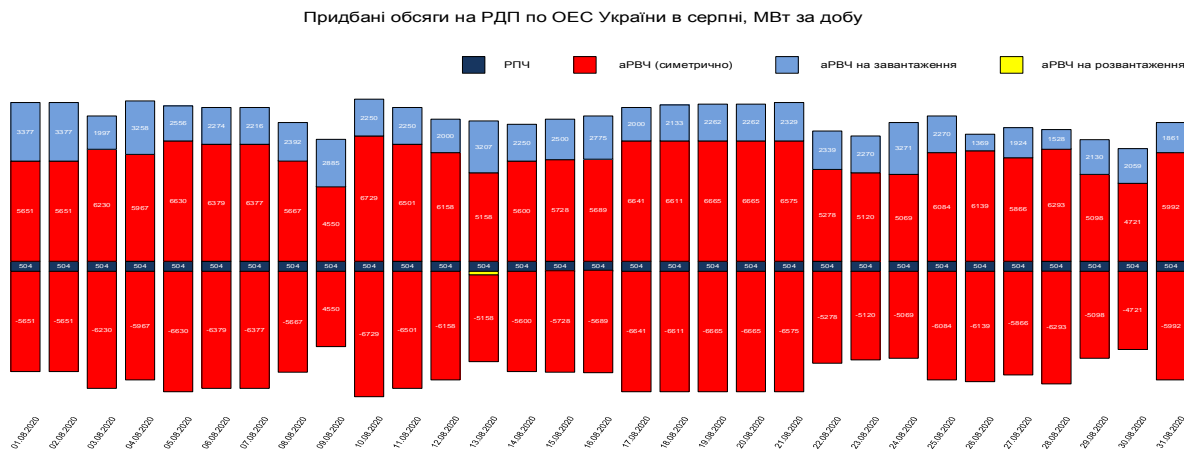


Рис. 2 – Результати роботи РДП за серпень 2020 року

Виходячи з вище наведеної інформації, СНЕ замовника буде приймати участь на РДП з використання $\pm 0.4S_n$ для надання послуги з аРВЧ. При подачі заявки на симетричні послуги РПЧ та аРВЧ, обсяг вказується лише в одному з напрямків, при цьому ціна не має перевищувати величину, яка являє собою суму граничних цін на завантаження та на розвантаження ($512,27 + 289,27 = 801,54$). Враховуючи, що на сьогоднішній день недостатній рівень пропозицій по аРВЧ, ціна за дану послугу приймається максимальна, 801,54 (грн/МВт без ПДВ).

Купівля та продаж електроенергії буде здійснюватися на балансуєчому ринку [12, 13] відповідно до Правил ринку електричної енергії України [14, 15], за цінами небалансу, ІМSP (грн/МВт*год) [12], плата за передачу та розподіл (Вінницька область) складає 24 та 15 коп/кВт*год відповідно.

Передбачається що СНЕ ємністю 5 МВт*год та DOD 80% буде працювати на симетричних послугах наступним чином:

- 00:00–01:00 при першому включення в мережу СНЕ з «пустими» акумуляторами відбувається заряд установки шляхом купівлі електроенергії на БР

3,255 МВт*год. В результаті ємність СНЕ буде складати 3,1 МВт.

3,255 МВт*год складається з

- 2 МВт*год – симетрична електроенергія при DOD 80%, тобто $5 * 0,8 / 2 = 2$ МВт*год, яка буде використана для задіяння резерву аРВЧ;

- 1 МВт*год – для забезпечення залишкової електроенергії в акумуляторах при DOD 80%, тобто $5 * (1 - 0,8) = 1$ МВт*год;

- 0,155 кВт*год – 5% втрати від 3,1 МВт*год в режимі заряду.

- 01:00–02:00 за командою диспетчера відбувається задіяння резерву аРВЧ у мережу СНЕ видає 2 МВт*год по вартості БР з отриманням плати за готовність. З врахуванням 5% втрат в інверторі з СНЕ буде використано 2,1 МВт*год. В результаті ємність СНЕ складатиме 1 МВт*год.

- 02:00–03:00 відбувається заряд установки шляхом купівлі електроенергії на БР 2,205 МВт*год (0,105 МВт*год складають 5%). У результаті ємність СНЕ складає 3,1 МВт*год.

В наступні години СНЕ працює до кінця доби циклічно з погодинним розрядом/зарядом аналогічно періоду, описаного з 01:00 до 03:00 год. Повний розрахунок наведено на рис. 3.

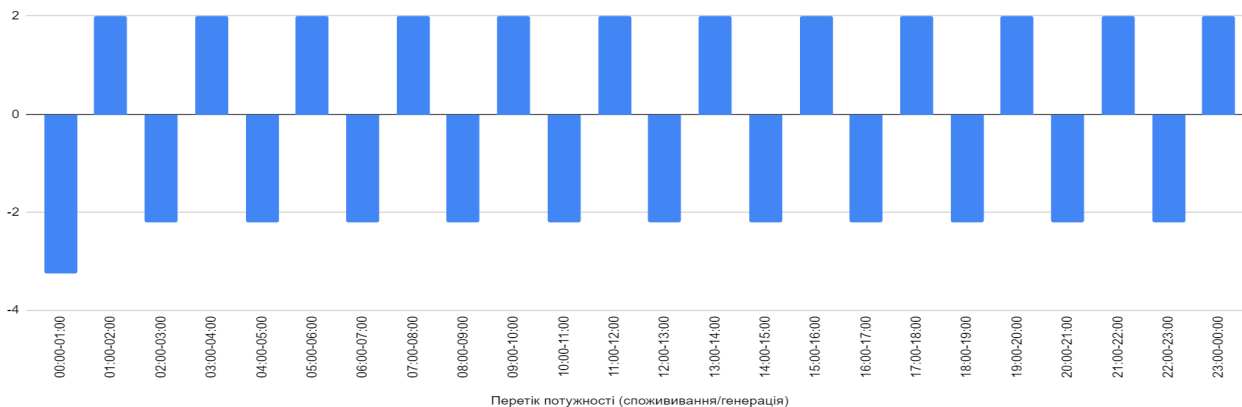


Рис. 3 – Розрахунок добового графіку роботи СНЕ

Сальдо перетоків за перший день складає – 3,51 МВт*год, а за другий і всі наступні дні – 2,46 МВт*год. У зв'язку з тим, що СНЕ у перший день починає працювати з нуля.

– Для СНЕ даної потужності та ємності дохід за добу складає 19 114,90 грн з урахуванням ПДВ. Відповідно до проведених розрахунків середньодобове сальдо перетоків складає 2,495 МВт*год.

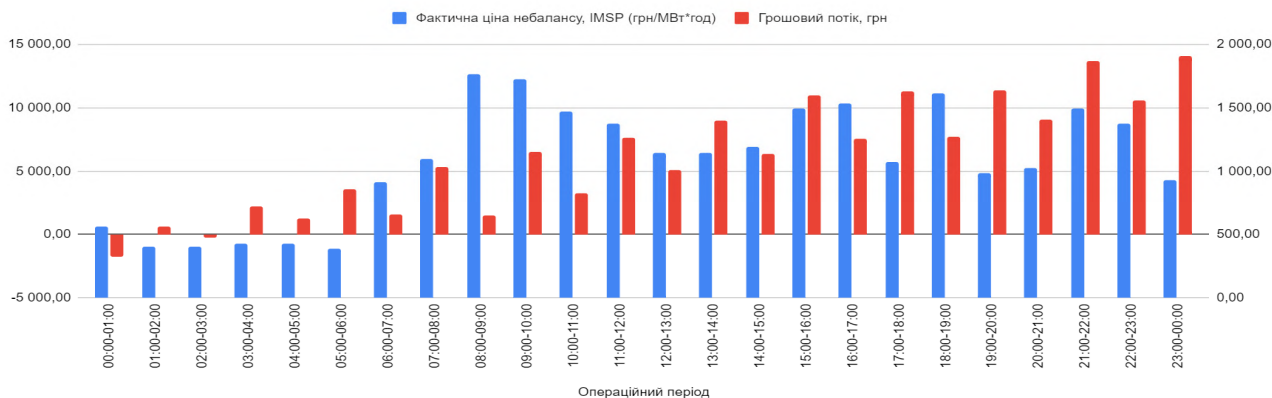


Рис. 4 – Графік зміни цін на балансуєчому ринку (права вісь) та зміни грошового потоку (ліва вісь) за добу

Висновки

Передумовами впровадження систем накопичення енергії є постійний ріст обсягів негарантованої генерації ВДЕ та фактичне спрацювання свого паркового ресурсу значною частиною теплової генерації, що на сьогоднішній день, разом з гідроелектростанціями є основними засобами балансування енергосистеми. Такі фактори значно впливають на операційну безпеку роботи ОЕС України.

Оскільки впровадження нових технологій потребує капіталовкладень, в роботі розроблена математична модель функціонування накопичувача на ринку на добу наперед, балансуєчому та ринку допоміжних послуг, що дає змогу визначити термін окупності такого проекту під час надання допоміжних послуг оператору системи передачі.

Список літератури

1. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В., Котилко І. В., Прокопенко І. О. Оцінювання якості електропостачання в локальних електричних системах з різнотипними відновлювальними джерелами енергії. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка*. 2018. Вип. 195. С. 23–25.
2. Блінов І. В., Парус Є. В., Іванов Г. А. Дослідження організації конкурентної моделі ринку електроенергії України з урахуванням мережевих обмежень в ОЕС України. *Пр. Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 45. С. 34–39.
3. Кириленко О. В., Блінов І. В., Парус Є. В. Оцінка роботи електростанцій при наданні допоміжних послуг з первинного та вторинного регулювання частоти в ОЕС України. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 5. С. 55–60.
4. Feng L, Zhang J. N., Li G. J. [et al]. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation

- between wind and PV power. *Prot Control Mod Power Syst*. 2016. 1(1). doi: 10.1186/s41601-016-0021-1.
5. Chen Q., Liu D., Lin J. et al. Business models and market mechanisms of energy internet. *Power Syst Technol*. 2015. 11(39). doi: 10.1109/HICSS.2001.927035
6. Li H., Abinet T. E., Zhang J. H. et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables. *Prot Control Mod Power Syst*. 2017. 2(1). doi:10.1186/s41601-017-0040-6.
7. Vatanparvar K., Al Faruque M. A. Design Space Exploration for the Profitability of a Rule-Based Aggregator Business Model Within a Residential Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015. Vol. 6. No. 3. P. 1167–1175. doi: 10.1109/TSG.2014.2380318.
8. Hidalgo-León R. et al. A survey of battery energy storage system (BESS), applications and environmental impacts in power systems. *2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*. 2017. P. 1–6. doi: 10.1109/ETCM.2017.8247485.
9. Wu D., Gui Q., Zhao W., Wang J., Shi S., Zhou Y. Battery Energy Storage System (BESS) Sizing Analysis of Bess-Assisted Fast-Charge Station Based on Double-Layer optimization Method. *2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS)*. 2020. P. 658–662. doi: 10.1109/SCEMS48876.2020.9352324.
10. Актуальні Граничні ціни на ДП на 2020 рік. *HEK Укренерго*. URL: https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/04/Granychni-tsiny_2020_red3.pdf (дата звернення 26.04.2021).
11. Реєстр одиниць надання допоміжних послуг на 30.09.2020. *HEK Укренерго*. URL: https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/09/Reyestr-PDP_30.09.2020.pdf (дата звернення 26.04.2021).
12. Деталі аукціонів згідно Графіка проведення аукціонів. *HEK Укренерго*. URL: https://ua.energy/uchasnikam_rinku/balansuyuchyj-rynok-ta-rynok-dopomizhnyh-poslug/dopomizhni-poslugy/auksiony-na-dopomizhni-poslugy-2020-j-rik/ (дата звернення 26.04.2021).
13. Результати ринку допоміжних послуг за серпень 2020 року (ОЕС України + Бурштин). *HEK Укренерго*. URL: <https://ua.energy/peredacha-i->

- dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/dopomizhni-poslugy/ (дата звернення 26.04.2021).
14. Фактичні ціни небалансів. *НЕК Укренаерго*. URL: https://ua.energy/uchasnikam_rinku/rezultaty-balansuyuchogo-rynku-2/#1590479495816-2c212666-d2fa (дата звернення 26.04.2021).
 15. Робота ринку електроенергії за серпень 2020 р. URL: <https://www.slideshare.net/Ukrenergo/2020-238748424> (дата звернення 26.04.2021).
 16. Кодекс системи передачі. *Постанова НКРЕКП* від 14.03.2018 № 309.
 17. Правила ринку. *Постанова НКРЕКП* від 14.03.2018 № 307.

References (transliterated)

1. Lezhnyuk P. D., Komar V. O., Kravchuk S. V., Kotylo I. V., Prokopenko I. O. Otsinyuvannya yakosti elektropostachannya v mistsevykh elektrichnykh systemakh z riznotypnymu vidnovlyuval'nymu dzherelamy enerhiyi [Evaluation of power supply quality in local electrical systems with different types of renewable energy sources] *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*, 2018, Iss. 195, pp. 23–25.
2. Blinov I. V., Parus Ye. V., Ivanov H. A. Doslidzhennya orhanizatsiyi konkurentnoyi modeli rynku elektroenerhiyi Ukrayiny z urakhuvannam merezhevykh obmezhen' v OES Ukrayiny [Research of the organization of the competitive model of the electricity market of Ukraine taking into account network restrictions in the UES of Ukraine]. *Pr. Intu elektrodynamiky NAN Ukrayiny*, 2016, Iss. 45, pp. 34–39.
3. Kyrylenko O. V., Blinov I. V., Parus Ye. V. Otsinka roboty elektrostantsiy pry nadanni dopomizhnykh poslug z pervynnoho ta vtorynnoho rehulyuvannya chasto v OES Ukrayiny [Evaluation of power plants in the provision of ancillary services for primary and secondary frequency control in the UES of Ukraine]. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2013, no. 5, pp. 55–60.
4. Feng L., Zhang J. N., Li G. J. [et al]. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power. *Prot Control Mod Power Syst.*, 2016, 1(1), doi: 10.1186/s41601-016-0021-1.
5. Chen Q., Liu D., Lin J. [et al]. Business models and market mechanisms of energy internet. *Power Syst Technol.*, 2015, 11(39), doi: 10.1109/HICSS.2001.927035.
6. Li H., Abinet T.E., Zhang J.H. [et al] Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables. *Prot Control Mod Power Syst.*, 2017, 2(1), doi:10.1186/s41601-017-0040-6.
7. Vatanparvar K., Al Faruque M. A. Design Space Exploration for the Profitability of a Rule-Based Aggregator Business Model Within a Residential Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, Vol. 6, no. 3, pp. 1167–1175, doi: 10.1109/TSG.2014.2380318.
8. Hidalgo-León R. [et al.] A survey of battery energy storage system (BESS), applications and environmental impacts in power systems. *2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, 2017, pp. 1–6, doi: 10.1109/ETCM.2017.8247485.
9. Wu D., Gui Q., Zhao W., Wang J., Shi S., Zhou Y. Battery Energy Storage System (BESS) Sizing Analysis of Bess-Assisted Fast-Charge Station Based on Double-Layer optimization Method. *2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS)*, 2020, pp. 658–662, doi: 10.1109/SCEMS48876.2020.9352324.
10. Faktychni hranychni tsyny na DP na 2020 rik [Actual Marginal prices for SOEs for 2020] *NEK Ukrenerho*. Available at: https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/04/Granychni-tsyny_2020_red3.pdf (accessed 26.04.2021).
11. Reyestr odynyts' nadannya dopomizhnykh poslug na 30.09.2020 [Register of ancillary services units on 30.09.2020] *NEK Ukrenerho*. Available at: https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/09/Reyestr-PDP-_30.09.2020.pdf (accessed 26.04.2021).
12. Detali auktsioniv za dopomohoyu Hrafika provedennya auktsioniv [Details of auctions according to the Schedule of auctions]. *NEK Ukrenerho*. Available at: https://ua.energy/uchasnikam_rinku/balansuyuchyj-rynk-ta-rynok-dopomizhnyh-poslug/dopomizhni-poslugy/auksiony-na-dopomizhni-poslugy-2020-j-rik/ (accessed 26.04.2021).
13. Rezul'taty rynku dopomizhnykh poslug za serpen' 2020 roku (OES Ukrayiny + Burshtyn) [Results of the market of ancillary services for August 2020 (UES of Ukraine + Amber)]. *NEK Ukrenerho*. Available at: <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/dopomizhni-poslugy/> (accessed 26.04.2021).
14. Faktychni tsyny nebalansiv [Actual imbalance prices]. *NEK Ukrenerho*. Available at: https://ua.energy/uchasnikam_rinku/rezultaty-balansuyuchogo-rynku-2/#1590479495816-2c212666-d2fa
15. Robota rynku elektroenerhiyi za serpen' 2020 roku <https://www.slideshare.net/Ukrenergo/2020-238748424> (accessed 26.04.2021).
16. Kodeks systemy peredachi [Transmission System Code]. *Postanova NKREKП* of 14.03.2018 no. 309
17. Pravyly rynku [Market rules]. *Postanova NKREKП* of 14.03.2018 no. 307.

Відомості про авторів (About authors)

Лежнюк Петро Дем'янович – доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: lezhpd@gmail.com.

Petro Lezhnyuk – Doctor of Technical Sciences (Ph. D), professor, Vinnitsa National Technical University, assistant of power plants and systems department; Vinnitsa, Ukraine; e-mail: lezhpd@gmail.com.

Кравчук Сергій Васильович – кандидат технічних наук, асистент, Вінницький національний технічний університет, асистент кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: sv.kravchuk@ukr.net.

Sergey Kravchuk – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), assistant, Vinnitsa National Technical University, assistant of power plants and systems department; Vinnitsa, Ukraine; e-mail: sv.kravchuk@ukr.net.

Малогоулко Юлія Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, асистент кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: malogulko.y.v@vntu.edu.ua.

Yulia Malogulko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Senior Lecturer, Vinnitsa National Technical University, assistant of power plants and systems department; Vinnitsa, Ukraine; e-mail: malogulko.y.v@vntu.edu.ua.

Прокопенко Ігор Олександрович – аспірант, Вінницький національний технічний університет, асистент кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: delfin11071994@gmail.com.

Ihor Prokopenko – Postgraduate, Vinnitsa National Technical University, assistant of power plants and systems department; Vinnitsa, Ukraine; e-mail: delfin11071994@gmail.com.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю так:

Лежнюк П. Д., Кравчук С. В., Малогулко Ю. В., Прокопенко І. О. Математичне моделювання роботи системи накопичення енергії на ринку допоміжних послуг об'єднаної електроенергетичної системи України. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 21-29. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.04.

Please cite this article as:

Lezhniuk P., Kravchuk S., Malogulko Y., Prokopenko I. Mathematical modeling of battery energy storage systems in the additional service market of the united electric power system of Ukraine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2(8), pp. 21-29, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.04.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Лежнюк П. Д., Кравчук С. В., Малогулко Ю. В., Прокопенко И. А. Математическое моделирование системы накопления энергии на рынке вспомогательных услуг объединенной электроэнергетической системы Украины. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 21-29 doi:10.20998/2413-4295.2021.02.04.

АННОТАЦІЯ Внедрение систем накопления и дальнейшего переноса электроэнергии достаточно важная задача, которая решается в разных странах по-разному, исходя из типов продуктов, которые могут предоставляться системами накопления энергии. Анализ структуры генерирующих мощностей в Объединенной электроэнергетической системе Украины показывает значительный дефицит маневровых мощностей, среди которых на сегодня является тепловая генерация, имеет значительный уровень износа основного генерирующего оборудования и гидроэлектростанции. Исходя из вышеприведенного, логично было бы предположить, что запуском новой модели рынка электроэнергии, будут сформированы такие сегменты рынка, на которых ценовые сигналы станут привлекательными для инвестиций в новые маневровые мощности. Однако, на сегодняшний день, формирования таких сигналов, ограничено установлением верхних ценовых индексов на балансирующем рынке и рынке на сутки вперед. Итак, для моделирования работы систем накопления энергии, был избран рынок вспомогательных услуг, на котором системный оператор закупает услуги у поставщиков вспомогательных услуг. Моделирование работы систем накопления энергии для оказания вспомогательных услуг задача многокритериальная, учитывающая как технические особенности работы системы накопления энергии, так и соответствующие ценовые индексы, которые были сформированы для каждого вида услуги. В работе рассмотрена возможность предоставления услуг автоматического резерва восстановления частоты и услуг балансировки. На основе статистических данных по работе рынка вспомогательных услуг объединенной электроэнергетической системы Украины разработана математическая модель, позволяющая оценить эффект от использования систем накопления энергии, для предоставления услуг с первичного, вторичного и третичного регулирования частоты. Определены взаимосвязи между ценовыми индексами на рынке вспомогательных услуг и технико-экономическими характеристиками работы системы накопления энергии.

Ключевые слова: рынок вспомогательных услуг; система накопления энергии; резерв поддержки частоты; резерв восстановления частоты

Надійшла (received) 30.04.2021

УДК 537.86+621.373.14

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.05

КВАЗІОПТИЧНИЙ ТВЕРДОТІЛЬНИЙ ГЕНЕРАТОР З ВІДКРИТОЮ КВАЗІОДНОЧАСТОТНОЮ СФЕРОЕШЕЛЕТНОЮ КОЛИВАЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ

I. П. ОЛЬХОВСЬКИЙ¹, А. М. ФУРСОВ²

¹ кафедра комп'ютерних систем та мереж, Харківський коледж Державного університету телекомунікацій, м. Харків, УКРАЇНА

² Харківський патентно-комп'ютерний коледж, м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: olkhovskiy_i_p@ukr.net

АНОТАЦІЯ Представлено результати дослідження, пов'язаного з розробкою ефективної високочастотної відкритої коливної системи квазіоптичних твердотільних генераторів міліметрового і субміліметрового діапазонів довжин хвиль. Показано, що для стабільної роботи твердотільних генераторів на діодах Ганна і лавино-пролітних діодах, розміщених всередині відкритого резонатора, потрібне істотне розрідження спектру резонансних частот, що виключає переходи частоти генерації. З урахуванням цієї вимоги в якості відкритої коливної системи твердотільних генераторів запропонований сфероешелетний відкритий резонатор, одне з дзеркал якого має відбивну решітку типу "ешелет". У роботі наведені результати "холодних" вимірювань спектра резонансних частот сфероешелетного відкритого резонатора, які свідчать про те, що він дійсно має істотно розріджений спектр як по поперечним, так і, що дуже важливо, по поздовжнім типам коливань. Обговорено і реалізовані на практиці умови, необхідні для збудження в твердотільному генераторі на базі сфероешелетного відкритого резонатора добротних стабільних коливань з високим ККД. Наведено результати експериментального дослідження квазіоптичного генератора на лавино-пролітних діодах 8-мм діапазону довжин хвиль. Представлені аналіз отриманих характеристик і їх якісне пояснення на основі запропонованої моделі процесів, які протікають в досліджуваному генераторі. Показано, що сфероешелетний відкритий резонатор може бути використаний в якості резонансної системи не тільки твердотільних, а також і електровакуумних приладів у всьому діапазоні НВЧ. Намічено шлях в напрямку подальшого розрідження спектра сфероешелетного відкритого резонатора з метою створення реально одночастотної відкритої коливної системи.

Ключові слова: квазіоптичний твердотільний генератор; діод Ганна; лавино-пролітний діод; ешелет; сфероешелетний відкритий резонатор; одночастотна відкрита коливальна система

QUASIOPTICAL SOLID-STATE GENERATOR WITH OPEN QUASI-FREQUENCY SPHEREOSELETAL OSCILLATING SYSTEM

I. ODKHOVSKIY¹, A. FURSOV²

¹ department of computer systems and networks, Kharkiv College of State University of Telecommunications, Kharkiv, UKRAINE

² Kharkiv patent-computer college, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The results of research related to the development of an effective high-Q open oscillatory system of quasi-optical solid-state generators of millimeter and submillimeter wavelength ranges are presented. It is shown that for the stable operation of solid-state generators based on Gunn diodes and avalanche-transit diodes (ATDs) located inside an open resonator (OR), a significant rarefaction of the resonance frequency spectrum is required, which excludes jumps of the generation frequency. Taking this requirement into account, a sphereoselett open resonator (SE OR) is proposed as an open oscillatory system of solid-state generators, one of the mirrors of which is a reflective lattice of the "echelette" type. The paper presents the results of "cold" measurements of the spectrum of resonance frequencies of the SE OR, which indicate that the SE OR indeed has a significantly rarefied spectrum both in transverse and, which is very important, in longitudinal modes of oscillations. The conditions necessary for the excitation of high-quality stable oscillations with high energy efficiency in a solid-state generator based on an SE OR are discussed and implemented. The results of an experimental study of a quasi-optical generator based on an 8-mm ATD wavelength range are presented. The analysis of the obtained characteristics and their qualitative explanation on the basis of the proposed model of the processes occurring in the investigated generator are presented. It is shown that the SE OR can be used as a resonant system in the entire EHF range of not only solid-state, but also electronic-vacuum devices. Finally, a way is outlined in the direction of further rarefaction of the spectrum of the SE OR in order to create a really single-frequency open oscillatory system.

Keywords: quasi-optical solid state generator; Gunn diode; avalanche diode; echelette; sphereoselett open resonator; single frequency open oscillating system

Вступ

Проблемі розрідження спектра коливної системи будь-якого автогенератора резонансного типу приділяється, як відомо [1,2], велика увага, оскільки від її вирішення залежить стійкість роботи приладу.

Особливе значення в зв'язку з цим надається розрідженню спектра коливальних систем в міліметровому (ММ) і субміліметровому (СубММ)

діапазонах хвиль [3] в силу різкого зменшення розмірів об'ємних або хвилевидних резонансних систем і, як наслідок, значного згущення їх спектральних компонент, що приводить в загальному випадку до виникнення неконтрольованих перескоків частоти генерації, які порушують роботу джерела коливань.

Одним з можливих шляхів виходу з положення, яке створилося, є використання в якості коливальних систем генераторів в ММ і СубММ діапазонах хвиль

відкритих резонаторів (ВР) з гладкими дзеркалами правильної геометричної форми (плоскі, сферичні, циліндричні і т.д.), які володіють, як відомо [4,5], високою добротністю Q і істотно розрідженим спектром в порівнянні зі спектром об'ємних резонаторів.

Однак в ряді випадків і цього ступеня розрідження спектра виявляється недостатньо. Слід до того ж додати, що розрідження спектра в зазначених ВР обмежується лише селекцією по поперечних типах коливань. Здійснити розрідження спектра коливальної системи одночасно по поперечним і по поздовжнім індексам, а також наблизитися до межі одночастотного режиму збудження коливань, як виявилось, можна в ВР, дзеркала яких мають кутову дисперсію [6,7].

Дослідження показали, що коливальні системи подібного типу можуть бути реалізовані на базі відбивних дифракційних решіток типу "ешелет" [8,9], що дозволяють максимально розділити спектр ВР в режимі автоколімації [10] і впритул наблизитися до одночастотного режиму роботи коливальної системи. В роботі [11] були отримані перші результати по реалізації генератора на діоді Ганна (ДГ), виконаного на основі ВР з ешелетним дзеркалом. Значно підвищити основні параметри ДГ, включаючи його потужність, а також змусити ефективно генерувати лавино-пролітний діод (ЛПД), що виконати набагато складніше в порівнянні з ДГ, вдалося в істотно модифікованій коливальній системі, запропонованій в роботі [8].

Мета роботи

Створення та дослідження високодобротних відкритих коливальних систем з максимальним розрідженням спектру для твердотільних і електровакуумних генераторів КВЧ діапазону довжин хвиль.

Виклад основного матеріалу

Зупинимося на конструктивних особливостях квазіоптичного генератора на ЛПД (КГЛПД) зі сфероешелетною відкритою коливальною системою.

Схематично конструкція генератора 8-мм діапазону хвиль зображена на рис. 1. Резонансна система КГЛПД сформована на базі модифікованого сфероешелетного відкритого резонатора (СЕ ВР), який утворений сферичним дзеркалом 1 (діаметр $D = 90$ мм, радіус кривизни $R = 180$ мм) і ступінчастою відбивною дифракційною решіткою типу "ешелет" 2, яка має прямокутну апертуру (ширина дисперсійного дзеркала - 80 мм, довжина - 120 мм; кут при вершині зубця - 90° , кут "блиску" - 45° ; розміри ідентичних ступенів $b_1 = b_2 = 4,0$ мм). СЕ ВР збуджується в режимі автоколімації, оскільки виконуються наступні умови: 1) $b_1 = b_2 = \lambda/2$, де: λ - довжина хвилі випромінювання в резонаторі; 2) початкова установка кута гоїдання ешелета $\varphi = 45^\circ$, тобто має місце рівність φ куту "блиску" решітки. В процесі роботи автогенератора відстань L між дзеркалами СЕ ВР може змінюватися в широких межах.

У центрі увігнутого дзеркала 1 виконано вивід електромагнітної енергії у вигляді звуженого по

вузькій стінці прямокутного хвилеводу перетином $7,2 \times 3,4$ мм², який закінчується на поверхні відбивача щільною зв'язку перетином $7,2 \times 0,5$ мм².

Сферичне дзеркало 3 вводиться до складу відкритої коливальної системи виключно для дослідження його впливу на спектр і характеристики вихідного робочого дводзеркального квазіоптичного генератора.

Основна особливість конструкції КГЛПД полягає в тому, що з метою узгодження діода з полем СЕ ВР активний модуль - штифт циліндричної форми (діаметр - 3,0 мм, висота - 5,0 мм), на торці якого розміщена кристалічна структура ЛПД, розташований в середній частині центральної ступені ешелету всередині прямокутного паза (поглиблення), утвореного торцями двох рухливих брусків прямокутного перерізу, які можуть переміщатися уздовж нерухомої частини центральної ступені як по направляючій. При цьому активний модуль розташовується між торцями рухомих вкладишів (вісь активного модуля відстоїть від внутрішнього ребра нерухомої частини центральної ступені на відстані $b_1/2$).

Ширина кожного з рухомих брусків збігається з шириною ступені b_1 , а товщина d_2 вибирається з тих міркувань, щоб сумарна товщина нерухомої і рухомої частин центральної ступені ешелет збігалася з товщиною незбуреної ступені дифракційної решітки: $d_1 + d_2 = b_2$, де d_1 - товщина нерухомої частини центральної ступені. Штифт з активною структурою за допомогою спеціального механізму може переміщатися в напрямку нормалі до поверхні "неосвітленої" межі шириною b_1 . В процесі вимірювань здійснювалися як взаємне юстирування дзеркал СЕ ВР, так і варіювання кута гоїдання ешелет φ .

Подача напруги на діод виконується за допомогою пружної дротяної напівпетлі діаметром $\sim 2,0$ мм, один кінець якої припаяний до латунного диска діаметром $\sim \lambda/2$, який узгоджує радіальний резонатор, а другий - виведений за межі резонансного об'єму через електрично ізолюваний канал в тілі ешелету. Апробований і інший варіант, при якому струмоввід реалізується за допомогою тонкого латунного стержня діаметром $\sim 0,1 - 0,2$ мм, один кінець якого припаяний до узгоджувачого диску, а другий - до пружного металевий контакту, виконаному з берилієвої бронзи і має прямокутну форму (довжина $\sim 20,0$ мм, ширина, $\sim 2,0 \dots 3,0$ мм, товщина $\sim 0,2$ мм), при цьому зазначений металевий контакт також виведений з резонансного обсягу через електрично ізолюваний канал, який проходить в тілі ешелету.

Завершуючи опис конструктивних особливостей КГЛПД, відзначимо, що в СЕ ВР збуджуються виключно Н-поляризовані коливання з вектором напруженості електричного поля E , орієнтованим перпендикулярно шарам $p^+ - n - t - n^+$ переходу активної структури ЛПД, що дає можливість одночасно порушити в СЕ ВР добротні коливання з коефіцієнтом відбиття від решітки, близьким до одиниці, і реалізувати зв'язок між резонансним полем і діодом, близьким до максимального.

Вище було висловлено твердження, що СЕ ВР являє собою резонансну систему зі ступенем розрідження спектра, близького до максимального.

Покажемо це, спираючись на результати "холодних" електродинамічних вимірювань, методика яких викладена в роботах [12,13].

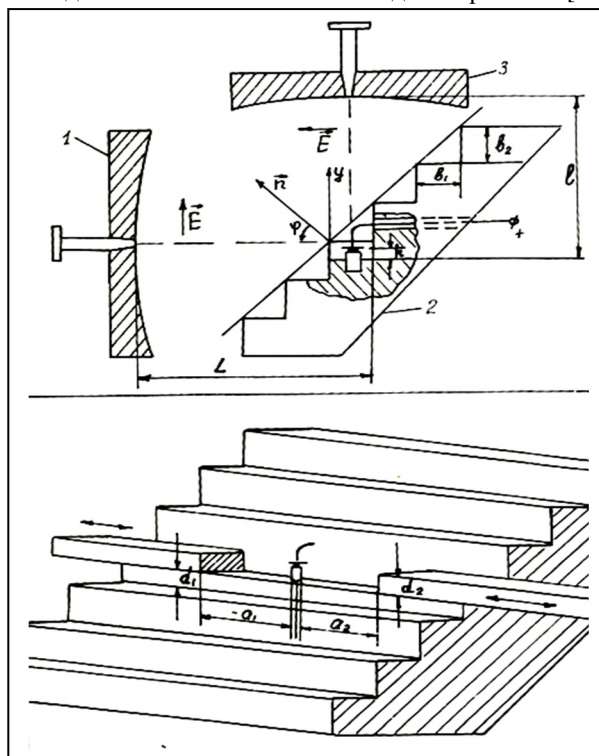


Рис. 1 - Схематичне зображення конструкції 8-мм квазіоптичного генератору на лавино-пролітному діоді

На рис. 2 і 3 наведені результати експериментального дослідження залежності коефіцієнта передачі Т двозеркального СЕ ВР (рис. 1, випадок $a_1 = a_2 = 0$, $l \rightarrow \infty$), що збуджується на основній моді TEM_{00q} , від частоти f зі значеннями відстаней $L = 80, 100$ і 120 мм, взятими в якості параметра (величина Т виражена у відносних одиницях; смуга частот електромагнітних хвиль, що подаються на вхід СЕ ВР, $\Delta f = 25 \dots 53$ ГГц).

Розглянуто два різновиди ступінчатих дзеркал: 1) півхвильовий ешелет з розмірами ступенів: $b_1 = b_2 = 4,0$ мм (рис. 2); 2) хвильовий ешелет з розмірами ступенів: $b_1 = b_2 = 8,0$ мм (рис. 3). Для порівняння на рис. 4 зображений спектр еквівалентного за розмірами напівсферичного ВР.

Видно, що коливання в СЕ ВР з обома різновидами решіток збуджуються в надзвичайно вузькій смузі частот Δf , центром якої є частота f , при якій в СЕ ВР встановлюється класичний автоколімаційний режим коливаний, який характеризується мінімальним рівнем втрат [10]. Також добре видно, наскільки істотно спектр СЕ ВР (рис. 2,3) розріджений в порівнянні зі спектром еквівалентного за розмірами напівсферичного ВР (рис.4).

Ідентифікація модового складу СЕ ВР показала, що спектр СЕ ВР розпадається на серію з інтервалом $\Delta f = c/2L$ (c - швидкість світла у вакуумі), кожна з яких включає в себе основний тип коливання TEM_{00q} , і найближчий до нього вищий тип коливання TEM_{10q} , при $L \leq R/2$ (R - радіус кривизни сферичного дзеркала)

незначно поступається основний моді за рівнем дифракційних втрат.

Всі інші спектральні компоненти СЕ ВР виявляються пригніченими в силу значної кутової дисперсії ешелетного дзеркала.

Топологія поля типу коливання TEM_{10q} , який збуджується в СЕ ВР з активним елементом, розміщеним всередині паза, являє собою дві плями (в проекції на поверхню ешелетного дзеркала), орієнтованих уздовж осі y (рис. 5), з мінімумом в центрі ешелетного дзеркала. Зупинимося на основних моментах процедури узгодження активного елемента з полем СЕ ВР, що має першорядне значення в приладах з відкритими коливальними системами. Причин тому кілька.

По-перше, на відміну від об'ємного коливального контуру, у відкритій резонансній системі завжди присутні специфічні втрати, зумовлені висвічуванням частини енергії резонансного поля у вільний простір при розсіянні електромагнітних хвиль як на неоднорідностях, які знаходяться як між дзеркалами, так і на поверхнях дзеркал. Під неоднорідностями на поверхні дзеркала розуміються будь-які конструктивні елементи, які дозволяють розмістити активний елемент на поверхні дзеркала і узгодити його з полем ВР, що приводить в свою чергу до порушення вихідної ідеальної геометричної форми поверхні дзеркал і до появи додаткових дифракційних втрат.

Зрозуміло, для того щоб генератор впевнено збуджувався, необхідно мінімізувати зазначені дифракційні втрати або втрати на розсіювання.

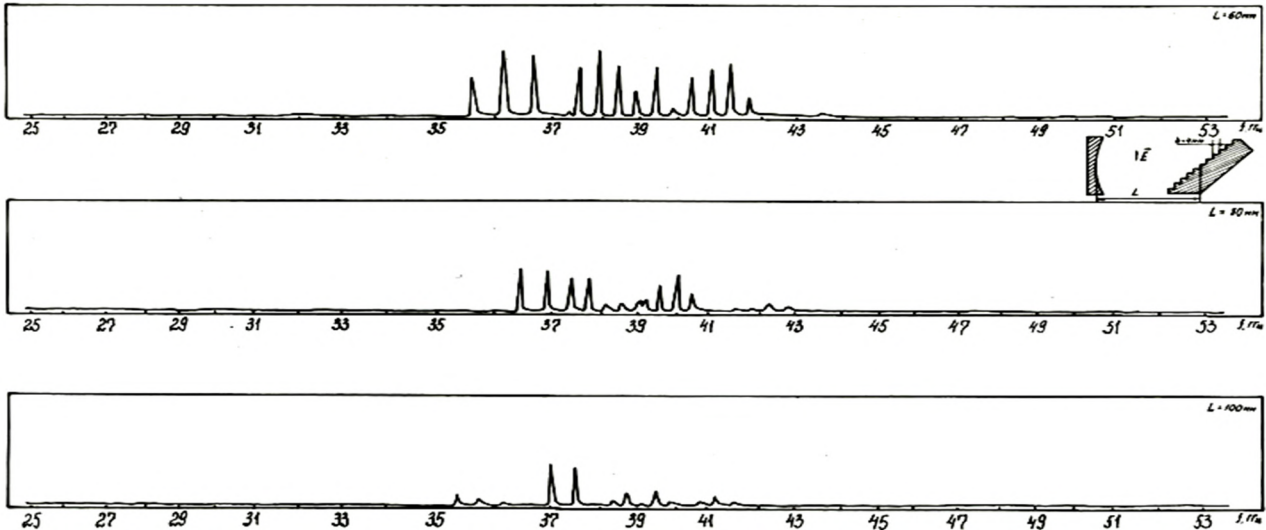


Рис. 2 - Залежність коефіцієнту передачі T незбудженого дводзеркального СЕ ВР від частоти f при фіксованих відстанях між дзеркалами: $L = 60, 80, 100$ мм; випадок $b_1 = b_2 = 4,0$ мм

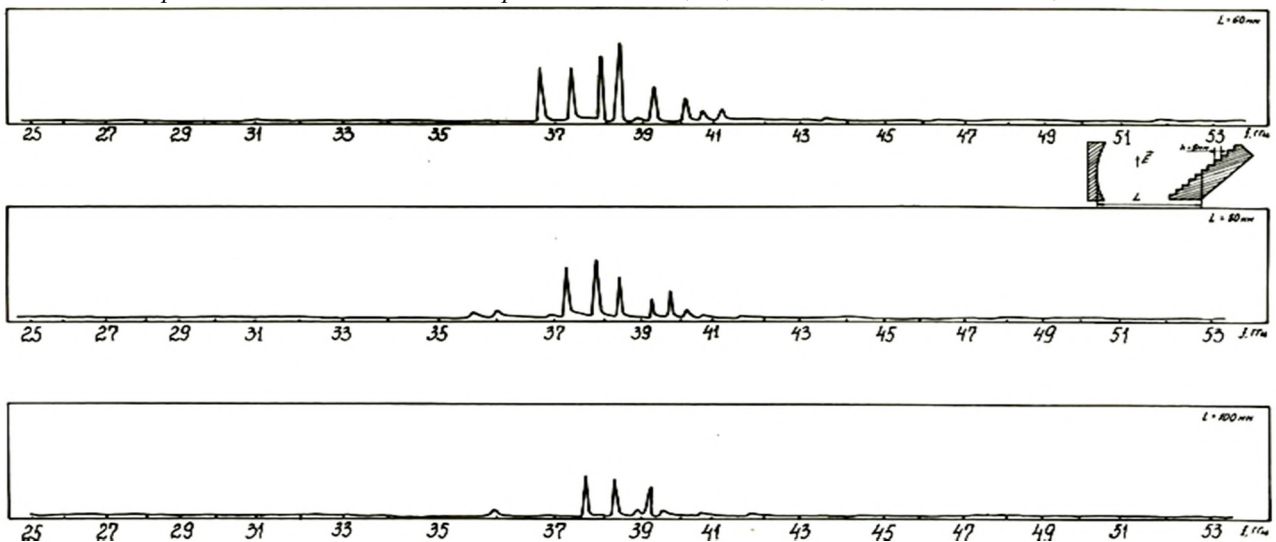


Рис. 3 - Залежність коефіцієнту передачі T незбудженого дводзеркального СЕ ВР від частоти f при фіксованих відстанях між дзеркалами: $L = 60, 80, 100$ мм; випадок $b_1 = b_2 = 8,0$ мм

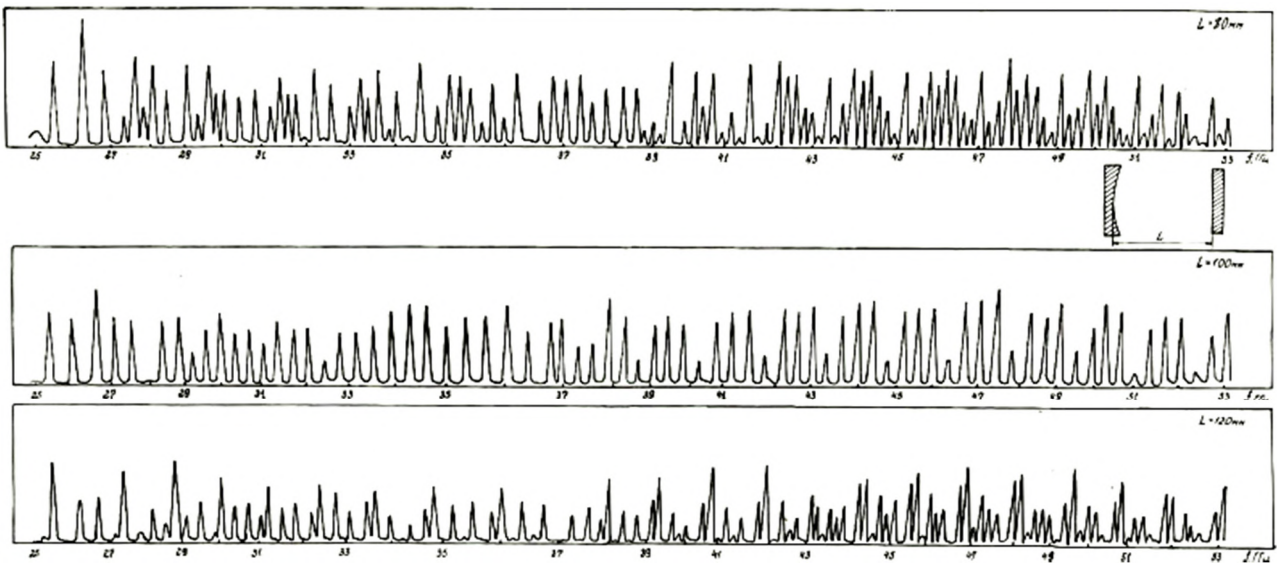


Рис. 4 - Залежність коефіцієнту передачі T еквівалентного напівсферичного ВР від частоти f при фіксованих відстанях між дзеркалами: $L = 80, 100, 120$ мм

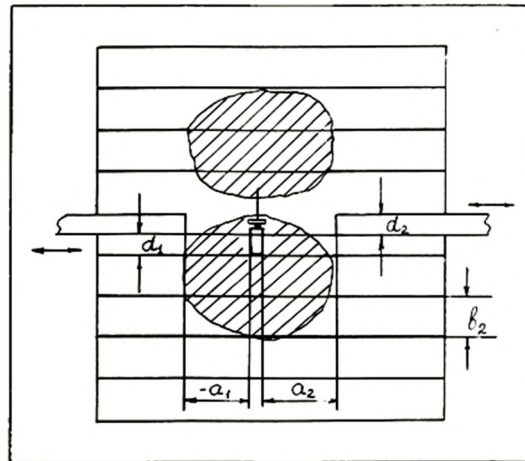


Рис. 5 - Проекція амплітудного розподілу поля моди TEM_{10q} на поверхні ешелетного дзеркала з діодом в прямокутному заглибленні

По-друге, реальні складові імпедансів активної структури R_d і BP в місці розташування активного елемента істотно розрізняються, що значно ускладнює процес узгодження (розрахунки показують, що R_{OP} в максимумі напруженості електричного поля E BP може скласти величину від декількох сотень кОм до одиниць МОм, в той час як R_d ЛПД близький до декількох сотень Ом).

Беручи до уваги ці два фактори, неважко показати, що розміщення активного елемента безпосередньо на незбуреній межі ешелету (в середній її частині, де локалізована максимум напруженості електричного поля E) має привести до невисокого ККД приладу внаслідок значного рівня втрат на розсіювання і великого перепаду значень R_d і R_{OP} (навіть з урахуванням використання радіального чвертьхвильового хвилеводу, який трансформує R_{OP} до затискачів діода).

Детальний аналіз ситуації, що склалася наводить на думку про те, що подолати зазначені недоліки можна, розмістивши активний елемент всередині прямокутного заглиблення, виконаного в тілі центральної ступені ешелету (рис. 1). У цьому випадку вирішуються обидві поставлені вище завдання: мінімізуються втрати на розсіювання за рахунок відбиття хвиль від торців брусків, які формують паз - відрізок жолобкового хвилеводу, і знижується до прийнятної величини коефіцієнт трансформації R_{OP} до R_d за рахунок застосування відрізка відкритого жолобкового хвилеводу як проміжного трансформатора.

На рис. 6 наведені енергетичні та частотні характеристики конкретного КГЛПД 8-мм діапазону хвиль.

Тут представлені графіки залежності $P_n(L)$ і $f(L)$ при фіксованих значеннях струму I , що протікає через діод, кута гойдання ешелета φ , товщини рухомих брусків d_2 , відстаней a_1 і a_2 , що відокремлюють торці вкладки від утворюючої циліндра - металевий штифта з напівпровідникової структурою на торці, форми і розмірів Г-подібної дрютяної петлі зв'язку і діаметра радіальної

узгоджуючої лінії - диску. Як параметр на даній стадії експерименту вибрана висота активного модуля h .

Обговорення отриманих результатів

Аналіз графіку показує, що генерація КГЛПД носить зонний характер, причому кількість зон, що відповідають збудженню в СЕ BP відповідних типів коливань (у всій смузі частот) не перевищує трьох. Як показали "холодні" [13] і "гарячі" (діелектричний зонд діаметром $\sim 1,0$ мм переміщається всередині резонансної системи генеруючого приладу і по зміщенню частоти генерації визначається відносний розподіл поля у відкритій коливальній системі) вимірювання амплітудного розподілу поля в СЕ BP , збудження основного типу коливання TEM_{00q} має місце в наступному діапазоні механічної перебудови частоти: $\Delta L = 42,3 \dots 43,5$ мм (рис. 6). В межах інтервалів механічного переналаштування частоти двох наступних зон (зліва - направо) (рис. 6) відбувається збудження двох типів коливань, відповідно, TEM_{10q} і TEM_{11q} .

Максимум потужності приладу зареєстрований при збудженні в коливальній системі моди TEM_{10q} (див рис. 5, де заштриховані області представляють собою схематичне зображення проєкцій плям резонансного поля на поверхню ешелету з діодом, встановленим в прямокутному поглибленні), що можна пояснити, виходячи з наступних фізичних міркувань.

Справді, амплітудний розподіл поля типу коливання TEM_{10q} такий, що на ділянці поверхні ешелету, займану відрізком жолобкового хвилеводу (розсіюючої неоднорідності) - доводиться периферійна частина одного з плям полів моди TEM_{10q} , в межах якої напруженість електричного поля E менше в порівнянні з напруженістю електричного поля E в центрі тієї ж плями поля виду коливання TEM_{10q} . Таким чином, чим менше інтенсивність поля в області неоднорідності, тим нижче рівень втрат на розсіювання у вільний простір.

Отже, величина добротності Q , так само як і потужність приладу, при збудженні в коливальній системі моди TEM_{10q} повинні бути свідомо вище тих же параметрів при збудженні в тій же коливальній

системі основного типу колювання TEM_{00q} , пляма поля якого цілком проектується на ділянку поверхні ешелету, займану неоднорідністю у вигляді прямокутного заглиблення.

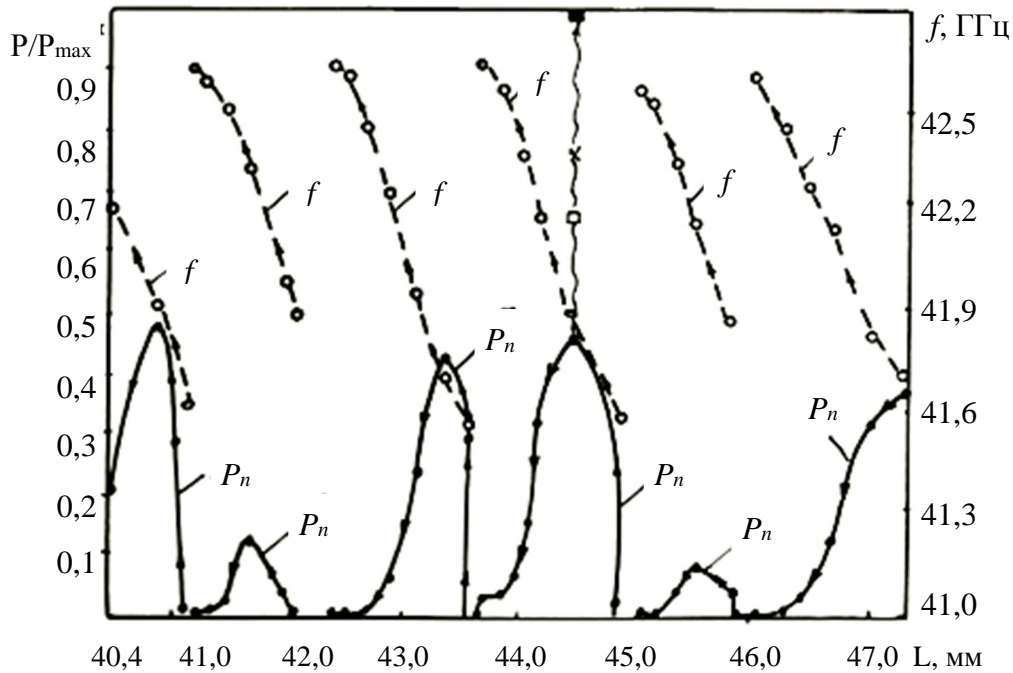


Рис. 6 - Залежність нормованої потужності $P_n = P/P_{max}$ і частоти генерації f від відстані L між дзеркалами при фіксованих $U = 30,9$ В, $I = 120$ мА, $\varphi = 38^\circ$, $a_1 = 3,7$ мм, $a_2 = 4,0$ мм, $d_2 = 2,7$ мм ($\circ - I = 150$ мА; $\square - I = 120$ мА, $\blacksquare - I = 150$ мА); варіант $h = 2,075$ мм

Зазначений висновок знаходиться в повній згоді з результатами експерименту за умови виконання нерівності: $L \geq R$, де R - радіус кривизни сферичного дзеркала.

Разом з тим необхідно мати на увазі, що зниження рівня втрат у коливальній системі, збуджуваної на моді TEM_{10q} , супроводжується зменшенням напруженості електричного поля E в області діода. Однак вказане деяке зниження зв'язку активного елемента з полем CE BP компенсується значно більшою, в порівнянні з основною модою TEM_{00q} , добротністю Q резонансної системи, що, в свою чергу, тягне за собою підвищення електронного ККД приладу.

Резюмуючи сказане, можна стверджувати, що коливальна система твердотільного квазіоптичного генератора характеризується тим, що основним типом колювання в ній стає перша азимутальна мода TEM_{10q} , яка в незбуреному CE BP є вищим видом колювання.

На закінчення зупинимося на реально досягнутих технічних характеристиках досліджуваного КГЛПД. Використовуючи ЛПД типу 3А7І7, вдалося отримати в діапазоні довжин хвиль $\lambda \approx 7,1$ мм потужність генерації приладу $P \approx 82$ мВт при струмі діода $I = 180$ мА.

Введення до складу відкритої коливальній системи КГЛПД додаткового сферичного дзеркала 3 (рис. 1), орієнтованого в напрямку осі y , сприяє збільшенню потужності P приладу в максимумі до 90 мВт (рис. 6).

Неважко зрозуміти причину цього явища. Справді, якщо в КГЛПД з дводзеркальною коливальною системою, що працює в автоколімаційному режимі, відбита від ешелету H -поляризована хвиля випромінюється у вільний простір через 0-й порядок дифракції (в напрямку осі y), то в трьохдзеркальній коливальній системі зазначена хвиля перехоплюється сферичним дзеркалом 3 і повертається (в потрібній фазі) в резонансну систему. У той же час введення в відкриту коливальну систему на базі CE BP додаткового дзеркала тягне за собою деяке згущення спектру резонансних частот.

Висновки

Вимірювання показали, що КГЛПД з високодобротною сильно розрідженою відкритою коливальною системою з прямокутним пазом на поверхні ешелетного дзеркала має високу якість спектру ("розсипання" мітки на екрані аналізатора спектра в шумоподібний сигнал не з'являлися) і стійкість генерації (переходи колювань на конкуруючі

частоти не зазначені). Зміщення частоти $\Delta f/f$ не перевищував $\sim 3 \cdot 10^{-6}$ за хвилину.

Необхідно відзначити для порівняння, що спроби змусити генерувати ЛПД, точно також встановлений в СЕ ВР, але не в прямокутний паз на поверхні ешелету, а безпосередньо на "неосвітленій" межі, не дали ніякого результату. Це є додатковим підтвердженням того факту, що запропонована в роботі відкрита коливальна система характеризується істотно більш низьким рівнем дифракційних втрат і оптимальним вирішенням питання узгодження ЛПД з резонансним полем відкритої коливальної системи.

Слід вказати на те, що запропонований СЕ ВР може бути використаний в будь-якій частині міліметрового і субміліметрового діапазонів довжин хвиль в якості квазіодночастотної відкритої коливальної системи як твердотільних, так і електровакуумних джерел електромагнітних хвиль.

Слід зазначити, що змінюючи профіль "освітлених" граней ступенів ешелета, тобто виконуючи його опуклим або увігнутим, можна домогтися ще більшого розрідження спектра СЕ ВР як для поперечних, так і, що найважливіше, для поздовжніх індексів. Така відкрита коливальна система тоді може кваліфікуватися вже не як квазіодночастотна, а як реально одночастотна.

Список літератури

1. Галутва Г. В., Рязанцев А. И. *Селекция типов колебаний и стабилизация частоты оптических квантовых генераторов*. М.: Связь, 1972. 72 с.
2. Bilous O. I., Fisun A. I., Kirilenko A. A., Natarov M. P., Shubnyi A. I., Sirenko S. P. Quasi-optical millimeter wave solid-state oscillators. Part 1: Open resonant system. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 78. 3. P. 229-249. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i3.40.
3. Ganapolskii E. M., Eremenko Z. E., Kuznetsova E. S. Experimental Detection of Wave Chaos in Quasi-Optical Microwave Cavity Resonator. *Chaotic Modeling and Simulation (CMSIM)*. 2019. 2. P. 235-244.
4. Nefyodov E. I., Smolskiy S. M. *Open Resonators*. In: *Electromagnetic Fields and Waves*. In: *Telecommunication Engineering*. Springer, Cham, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-90847-2_11.
5. Fox A. G., Li T. Resonant modes in a laser interferometer. *Bell System Technical Journal*. 1961. Vol. 40. 2. P. 453-488. doi: 10.1002/j.1538-7305.1961.tb01625.x.
6. Peng Xiao, Xuecu Tu, Lin Kang, Chengtao Jiang, Shimin Zhai, Zhou Jiang, Danfeng Pan, Jian Chen, Xiaoqing Jia, Peiheng Wu. Reflective grating-coupled structure improves the detection efficiency of THz array detectors. *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. 8032. doi: 10.1038/s41598-018-26204-y.
7. Булгаков Б. М., Фисун А. И., Фурсов А. М. Эффективный твердотельный квазиоптический генератор с резонансной системой типа "модифицированный эшелеттный открытый резонатор". *Материалы X Всесоюзной научной конференции "Электроника СВЧ"*. Минск, 1983. Т. 2. С. 133-134.
8. Мальшев В. И. *Введение в экспериментальную спектроскопию*. М.: Наука, 1979. 478 с.

9. Vlasov S. N., Katin S. V., Kuposova E. V. et al. Quasi-optical Three-Mirror Echelette Traveling-Wave Resonator with Frequency Tuning: Diffraction Theory and Experiment. *Radiophys Quantum El.* 2018. 61. P. 127-134. doi: 10.1007/s11141-018-9876-5.
10. Tatsuo Itoh and R Mittra. An analytical study of the echelette grating with application to open resonators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1969. 17(6). P. 319-327. doi: 10.1109/TMTT.1969.1126963.
11. Белоус О. И., Булгаков Б. М., Фисун А. И., Фурсов А. М. Открытые резонаторы с эшелеттом – новый класс высокодобротных колебательных систем твердотельных и электронновакуумных приборов КВЧ диапазона. *Материалы Всесоюзного научно-технического совещания "Малошумящие генераторы СВЧ. Состояние разработок и перспективы применения в метрологии"*. Иркутск, 1991. С. 93-94.
12. Белоус О. И., Булгаков Б. М., Фисун А. И., Фурсов А. М. Особенности режима автоколлимации в дисперсионном открытом резонаторе с фазокорректирующим зеркалом. *Письма в ЖТФ*. 1992. 18. 4. С. 46-52.
13. Булгаков Б. М., Леонов Ю. И., Фурсов А. М. Исследование поляризационных эффектов в открытых резонаторах миллиметровых длин волн. *Радиотехника. Издат. при ХГУ издат. объедин. "Вища школа"*. 1980. Вып. 53. С. 3-7.

References (transliterated)

1. Galutva G. V., Ryazanczev A. I. *Selekcziya tipov kolebanij i stabilizacziya chastoty` opticheskikh kvantovy`kh generatorov*. M. Svyaz`, 1972. 72 p.
2. Bilous O. I., Fisun A. I., Kirilenko A. A., Natarov M. P., Shubnyi A. I., Sirenko S. P. Quasi-optical millimeter wave solid-state oscillators. Part 1: Open resonant system. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019, Vol. 78, 3, pp. 229-249, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i3.40.
3. Ganapolskii E. M., Eremenko Z. E., Kuznetsova E. S. Experimental Detection of Wave Chaos in Quasi-Optical Microwave Cavity Resonator. *Chaotic Modeling and Simulation (CMSIM)*, 2019, 2, pp. 235-244.
4. Nefyodov E. I., Smolskiy S. M. *Open Resonators*. In: *Electromagnetic Fields and Waves*. In: *Telecommunication Engineering*. Springer, Cham, 2019, doi: 10.1007/978-3-319-90847-2_11.
5. Fox A. G., Li T. Resonant modes in a laser interferometer. *Bell System Technical Journal*, 1961, Vol. 40, 2, pp. 453-488, doi: 10.1002/j.1538-7305.1961.tb01625.x.
6. Peng Xiao, Xuecu Tu, Lin Kang, Chengtao Jiang, Shimin Zhai, Zhou Jiang, Danfeng Pan, Jian Chen, Xiaoqing Jia, Peiheng Wu. Reflective grating-coupled structure improves the detection efficiency of THz array detectors. *Scientific Reports*, 2018, Vol. 8, 8032, doi: 10.1038/s41598-018-26204-y.
7. Bulgakov B. M., Fisun A. I., Fursov A. M. E`ffektivny`j tverdotel`ny`j kvaziopicheskiy generator s rezonansnoj sistemoy tipa "modificirovanny`j e`shel'ny`j otkry`ty`j rezonator". *Materialy` Kh Vsesoyuznoj nauchnoj konferenczii "E`lektronika SVCh"*, Minsk, 1983, 2, pp. 133-134.
8. Maly`shev V. I. *Vvedenie v e`ksperimental`nyuyu spektroskopiyu*. M. Nauka, 1979. 478 p.
9. Vlasov S. N., Katin S. V., Kuposova E. V. et al. Quasi-optical Three-Mirror Echelette Traveling-Wave Resonator with Frequency Tuning: Diffraction Theory and

- Experiment. *Radiophys Quantum El*, 2018, 61, pp. 127-134, doi: 10.1007/s11141-018-9876-5.
10. Tatsuo Itoh and R Mitra. An analytical study of the echelette grating with application to open resonators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1969, 17(6), pp. 319-327, doi: 10.1109/TMTT.1969.1126963.
11. Belous O. I., Bulgakov B. M., Fisun A. I., Fursov A. M. Otkrytye rezonatory s e'shelettom – novyj klass vy'sokodobrotnykh kolebatel'nykh sistem tverdotel'nykh i e'lektronnavakuumnykh priborov KVCh diapazona. *Materialy Vsesoyuznogo nauchno-tekhnicheskogo soveshaniya "Maloshumyashhie generatory SVCh. Sostoyanie razrobotok i perspektivy primeneniya v metrologii"*. Irkutsk, 1991, pp. 93-94.
12. Belous O. I., Bulgakov B. M., Fisun A. I., Fursov A. M. Osobnosti rezhima avtokollimaczii v dispersionnom otkrytom rezonatore s fazokorrektiruyushhim zerkalom. *Pis'ma v ZhTF*, 1992, 18, 4, pp. 46-52.
13. Bulgakov B. M., Leonov Yu. I., Fursov A. M. Issledovanie polarizacziy i e'ffektov v otkrytykh rezonatorakh millimetrovykh dlin voln. *Radiotekhnika. Izdat. pri KhGU izdat. ob'ed. "Vishha shkola"*, 1980, 53, pp. 3-7.

Відомості про авторів (About authors)

Ольховський Іван Петрович – викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж, Харківський коледж Державного університету телекомунікацій; м. Харків, Україна; e-mail: olkhovskiy_i_p@ukr.net.

Ivan Olkhovskiy – lecturer, Kharkiv College of State University of Telecommunications; Kharkiv, Ukraine; e-mail: olkhovskiy_i_p@ukr.net.

Фурсов Анатолій Митрофанович – кандидат фізико-математичних наук, викладач, Харківський патентно-комп'ютерний коледж; м. Харків, Україна; e-mail: amfursov@gmail.com.

Anatoliy Fursov - PhD, lecturer, Kharkiv patent-computer college; Kharkiv, Ukraine; e-mail: amfursov@gmail.com

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Ольховський І. П., Фурсов А. М. Квазіоптичний твердотільний генератор з відкритою квазіодночастотною сферешелетною коливальною системою. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 30-37. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.05.

Please cite this article as:

Olkhovskiy I., Fursov A. Quasioptical solid-state generator with open quasi-frequency sphereosetal oscillating system. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 30-37, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.05.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Ольховский И. П., Фурсов А. М. Квазиоптический твердотельный генератор с открытой квазиодночастотной сферешелетной колебательной системой. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 30-37. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.05.

АННОТАЦІЯ Представлены результаты исследования, связанного с разработкой эффективной высокодобротной открытой колебательной системы квазиоптических твердотельных генераторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Показано, что для стабильной работы твердотельных генераторов на диодах Ганна и лавинно-пролетных диодах, размещенных внутри открытого резонатора, требуется существенное разрежение спектра резонансных частот, исключающее перескоки частоты генерации. С учетом этого требования в качестве открытой колебательной системы твердотельных генераторов предложен сферешелетный открытый резонатор, одно из зеркал которого представляет собой отражательную решетку типа "эшелетт". В работе приведены результаты "холодных" измерений спектра резонансных частот сферешелетного открытого резонатора, которые свидетельствуют о том, что сферешелетный открытый резонатор действительно обладает существенно разреженным спектром как по поперечным, так и, что очень важно, по продольным типам колебаний. Обсуждены и реализованы на практике условия, необходимые для возбуждения в твердотельном генераторе на базе сферешелетного открытого резонатора добротных стабильных колебаний с высоким КПД. Приведены результаты экспериментального исследования квазиоптического генератора на лавинно-пролетных диодах 8-мм диапазона длин волн. Представлены анализ полученных характеристик и их качественное объяснение на основе предложенной модели процессов, протекающих в исследуемом генераторе. Показано, что сферешелетный открытый резонатор может быть использован в качестве резонансной системы не только твердотельных, но и электровакуумных приборов во всем диапазоне КВЧ. Намечен путь в направлении дальнейшего разрежения спектра сферешелетного открытого резонатора с целью создания реально одночастотной открытой колебательной системы.

Ключевые слова: квазиоптический твердотельный генератор; диод Ганна; лавинно-пролетный диод; эшелетт; сферешелетный открытый резонатор; одночастотная открытая колебательная система.

Надійшла (received) 26.04.2021

УДК 621.314.1

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.06

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СХЕМ АКТИВНОГО БАЛАНСУВАННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

Б. О. СТИСЛО^{1*}, Р. В. ЗАЙЦЕВ², К. О. МІНАКОВА², М. В. КІРІЧЕНКО², О. В. ЄРЕСЬКО¹¹ кафедра промислової і біомедичної електроніки, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА² кафедра фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: bohdan.styslo@khpі.edu.ua

АНОТАЦІЯ В роботі виконано огляд існуючих схемних рішень пристроїв для балансування акумуляторних батарей. Описано принцип балансування на основі ємнісного та індуктивного буферного елемента. Показано особливості їх роботи і основні розрахунки кожного з типів пристроїв. Для схем з трансформаторною топологією вказано розрахункові значення для визначення балансуєчого струму. На підставі аналізу схемних рішень, чисельно визначено і доведено ефективність використання схемних рішень на основі індуктивних буферних елементів. Потужні акумуляторні батареї для систем електричного живлення використовуються у вигляді стеків, що складаються з послідовно-паралельного з'єднання одиничних накопичувачів. Під час їх експлуатації виникає проблема нерівномірного розряду або заряду, для компенсації якої необхідно виконувати балансування рівнів напруги в акумуляторах стеку. Безпека використання електрохімічних накопичувачів вимагає застосування спеціалізованих балансуєчих пристроїв. Найбільш ефективними, з енергетичної точки зору, є системи активного балансування. Аналіз математичної моделі роботи двох типів буферних елементів (ємнісного та індуктивного) дозволив дати якісну оцінку їх ефективності. Перші, в порівнянні з індуктивними - не тільки мають гірші енергетичні характеристики, але і не дозволяють виконувати «масштабування» пристрою без істотного ускладнення системи управління. Амплітудне значення струму у схемах з ємнісним буферним елементом обмежене лише внутрішніми паразитними опорами елементів схеми, тому, при відносно великому значенні розбалансування, в елементах схеми (в тому числі акумуляторних батареях) виділяється значна величина енергії втрат у вигляді теплової енергії, що негативно позначається на параметрах акумуляторної батареї. Амплітудне значення струму в схемі на основі індуктивних буферних елементів обмежене величиною індуктивності. Воно може бути розраховане на етапі проектування пристрою. Крім того, забезпечення системою керування переривчастого режиму роботи перетворювача дозволяє зменшити комутаційні втрати в силових ключах схеми і дозволяє підвищити ефективність роботи в цілому. При великій кількості накопичувачів (більше трьох) слід віддати перевагу трансформаторним системам балансування, як окремого випадку індуктивної топології.

Ключові слова: накопичувач енергії; акумуляторна батарея; балансування; схемне рішення; буферний елемент; режими роботи; ефективність

ANALYSIS OF BATTERIES ACTIVE BALANCE SCHEMES EFFICIENCY

B. STYSLO^{1*}, R. ZAITSEV², K. MINAKOVA², M. KIRICHENKO², O. ERESKO¹¹ Industrial and Biomedical Equipment Department, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE² Materials for Electronics and Solar Cells Department, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The paper reviews the existing circuit solutions of devices for balancing electric batteries. The balancing principle on the basis of capacitive and inductive buffer elements has been described. It was shown the features of their work and the basic calculations for each device type. For circuits with transformer topology, the calculated values for determining the balancing current are indicated. Based on the circuit solutions analysis, the efficiency of using solutions based on inductive buffer elements is numerically determined and proved. Powerful batteries for power supply systems are used in the form of stacks, consisting of a series-parallel connection of single cells. During their operation, there is a problem of uneven discharge or charge, to compensate which it is necessary to make voltage levels balancing in the stack batteries. For safely using electrochemical batteries the using of specialized balancing devices is required. The most efficient, from an energy point of view, are active balancing systems. The analysis of the mathematical model of two types (capacitive and inductive) buffer elements operation allowed to give a qualitative assessment of their efficiency. The first, in comparison with inductive - not only have worse energy characteristics, but also do not allow to perform "scaling" of the device without significant complication of the control system. The current amplitude value in circuits with a capacitive buffer element is limited only by the internal parasitic resistances of the circuit elements, therefore, with a relatively large value of imbalance, in circuit elements (including batteries) takes place a significant energy loss in the form of heat which negatively effects on rechargeable battery parameters. The current amplitude value in the circuit based on inductive buffer elements is limited by the inductance value. It can be calculated at the device design stage. In addition, providing the control system with intermittent converter operation allows to reduce switching losses in the circuit power switches and increases the overall operation efficiency. With a large number of batteries (more than three) should be preferred transformer balancing systems, as a special case of inductive topology.

Keywords: energy storage; battery; balancing; circuit solution; buffer element; operating modes; efficiency

Вступ

Останнім часом, розробники пристроїв перетворювальної техніки приділяють підвищену увагу структурам перспективних систем електрозабезпечення,

що мають в своєму складі електрохімічні накопичувачі електричної енергії (БСНЕ).

Однак, їх застосування в системах електроживлення вимагає використання спеціалізованих енергоефективних перетворювачів

електричної енергії: узгоджуючих – що забезпечують зв'язок між БСНЕ і мережею [1] та сервісних – що забезпечують безпечний режим роботи накопичувачів (вирівнювання рівнів напруги на послідовно з'єднаних акумуляторах, контроль за дотриманням граничних значень рівнів напруги на кожному з акумуляторів БСНЕ) [2]. Відомо, що акумуляторні батареї на основі літію мають ряд переваг над свинцево-кислотними, але вимагають більш жорсткого дотримання напруги на одиничному акумуляторі. Так, регламентований розробником діапазон напруги на LiFePO_4 акумуляторі складає 2,0-3,65В [3]. Вихід за нижню межу спричиняє передчасне «старіння» батареї, а вихід за верхню – може спричинити остаточний вихід з ладу накопичувача.

Потужні акумуляторні батареї для систем електричного живлення використовуються у вигляді стеків, що складаються з послідовно-паралельного з'єднання одиничних накопичувачів. Під час їх експлуатації виникає проблема нерівномірного розряду або заряду, для компенсації якої необхідно виконувати балансування рівнів напруги в акумуляторах стеку. Існує велика кількість схемних рішень, що здійснюють вирівнювання напруги. Умовно їх можна поділити на дві великих групи: системи пасивного (резистивного) і активного балансування.

Першу групу іноді називають «резисторним балансуванням» [4–6]. Такий метод переважно використовують в недорогих додатках. Практично вся надлишкова енергія від батарей з надмірним зарядом розсіюється у вигляді тепла, що, безумовно, є основним недоліком пасивного методу. В активному методі балансування [7–15] для передачі енергії від батарей з надлишковим зарядом до менш заряджених батарей використовуються ємності або індуктивності, втрати енергії в яких незначні.

Мета роботи

Метою даної роботи є порівняльний аналіз ефективності існуючих топологій схем активного балансування та визначення чисельного значення ефективності використання кожної з них.

Системи активного балансування

1. Активні балансири з ємнісним буферним елементом. Принцип роботи балансира пояснюється рис. 1 а, б. Для передачі енергії між акумуляторами $B1$ і $B2$, буферний конденсатор $C1$ спочатку підключається за допомогою ключів до акумулятора $B1$, за час $\Delta t1$ заряджається до значення напруги на акумуляторі $B1$, а на наступному такті роботи схеми, заряджений до величини U_{B1} конденсатор підключається за допомогою ключів $S1, S2$ до акумулятора $B2$, що має менший в порівнянні з акумулятором $B1$ рівень заряду. Кожен з ключів може бути виконаний на двох транзисторах, як показано на рис. 1, в.

Слід зазначити, що алгоритм переключення конденсатора при протилежному значенні зарядів акумуляторів (акумулятор $B2$ має надлишковий заряд, а акумулятор $B2$ - недостатній) не змінюється, а це

означає що немає необхідності чіткого визначення, який з пари акумуляторів має більший рівень напруги.

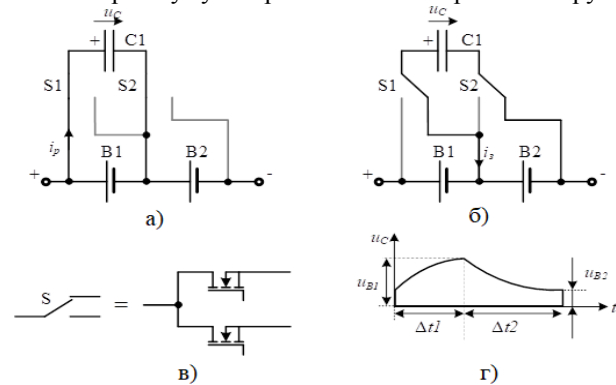


Рис. 1 – Принцип роботи ємнісного балансира

Модифікована схема балансира із одним конденсатором, що перемикається (рис. 2) для контролю за напругою на кожному з акумуляторів стеку має лише один датчик напруги, який вимірює напругу на конденсаторі. За допомогою двох ключів балансує конденсатор C може бути підключено до будь-якого акумулятора стеку. Вимірюючи в цей час напругу на конденсаторі, система керування може визначити значення поточного розбалансування в стеку.

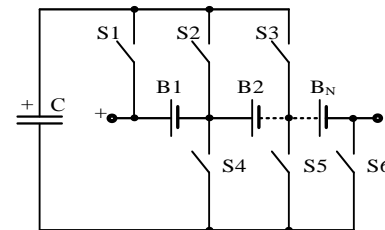


Рис. 2 – Модифікована схема ємнісного балансира

В схемі (рис. 2) вирішено проблему передачі енергії між двома акумуляторами, що знаходяться на протилежних кінцях стеку, оскільки перетворювач має можливість «адресної» передачі енергії минаючи включені між донором і акцептором акумулятори. Використання лише одного конденсатора, що перемикається, спрощує процес вимірювання напруги на акумуляторах та зменшує кількість датчиків напруги до одного.

Всім існуючим схемам балансірів на основі ємнісного буферного елемента притаманний суттєвий недолік: заряд конденсатора при відборі від акумулятора-донора надлишкової енергії та його розряд під час передачі енергії до акумулятора-акцептора відбувається неконтрольованим струмом, що, фактично, обмежений лише внутрішніми опорами елементів. Таким чином, основним недоліком балансірів з ємнісним буферним елементом є неможливість роботи балансира в оптимальному для акумуляторів режимі – джерела струму.

2. Активні балансири з індуктивним буферним елементом. Дуальною по відношенню до розглянутих вище активних балансірів є схема, де в

якості буферного елемента використовується індуктивність [16-20]. Робота схеми (рис. 3) схожа за принципом на схему (рис. 2). Схема балансування для N батарей, що наведено на рис. 3, складається з $N-1$ дроселів, що використовуються в якості буферного елемента під час обміну енергією між акумуляторами, та $2(N-2)+2$ ключів.

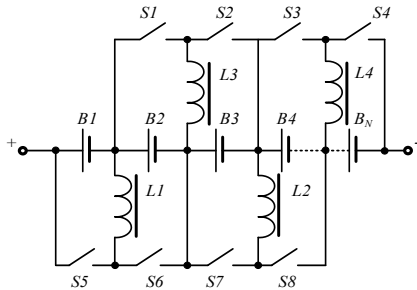


Рис. 3 – Схема активного балансира з індуктивностями, що перемикаються

В якості ключів можуть бути використані MOSFET-транзистори, як показано на рис. 4, а. В цьому випадку на другому півперіоді роботи схеми (інтервал Δt_2) можна не здійснювати керування ключем $S2$, оскільки напрямок протікання струму i_2 є прямим по відношенню до діода, що входить до внутрішньої структури транзистора.

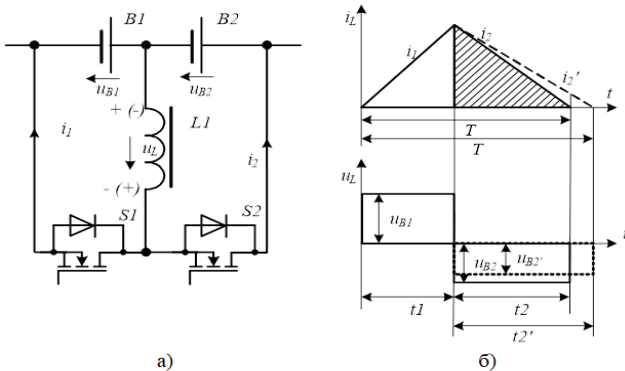


Рис. 4 – Принцип роботи перетворювача (а) і діаграми струм та напруги на обмотці індуктивного буферного елемента (б)

Робота балансира нагадує роботу широтно-імпульсного перетворювача, тому, балансір може працювати в двох режимах: переривчастий і безперервний. В першому режимі вся енергія, що була накоплена на протязі першого напівперіоду передається до акумулятора-акцептора за час другого напівперіоду, і струм i_2 встигає зменшитись до нуля. В другому режимі за час Δt_2 до акумулятора-акцептора передається лише частина енергії, що була накоплена на протязі першого півперіоду. Другий режим дозволяє зменшити пульсації струму, проте, викликає збільшення енергії комутації в ключах, оскільки комутація відбувається при ненульовому значенні струму, призводить до суттєвого збільшення потужності втрат в транзисторі [21,22].

3. Активні балансири на основі багатообмоточних трансформаторів.

Окремим класом активних балансірів виділяють схеми, де в якості буферного елемента для передачі енергії між акумуляторами використовується багатообмоточний трансформатор або декілька трансформаторів. Такі схемні рішення дозволяють сумістити в собі функції балансування та системи енергоменеджменту батареї. В ряді робіт [23–25] пропонується топологія (рис. 5). В інших модифікаціях схеми пропонується замість декількох окремих трансформаторів використання одного багатообмоточного трансформатора [26,27]. В цьому випадку достатньо лише однієї вторинної обмотки w_2 і одного діода $VD1$. Схема перетворювача виконана на базі оберненоходової топології. Принцип балансування розглянемо на прикладі: нехай акумулятор $B1$ має надлишковий заряд в порівнянні з іншими акумуляторами стека $B1-B_N$. На першому такті роботи схеми замикається ключ $S1$. В первинній обмотці трансформатора (інтервал $t_0 - t_1$ рис. 6) починає лінійно зростати струм від нульового значення до значення i_{1MAX} в цей час відбувається накопичення енергії в осерді трансформатора $TV1$, і, відповідно, зменшення її у акумуляторі $B1$. В цей час на обмотках трансформатора $TV1$ (всіх обмотках у випадку багатообмоточного трансформатора) прикладена напруга з полярністю, що вказана на рис. 6 без дужок. До діодів $VD1-VD_N$ прикладено зворотну напругу і струм у вторинних обмотках в цей час не протікає.

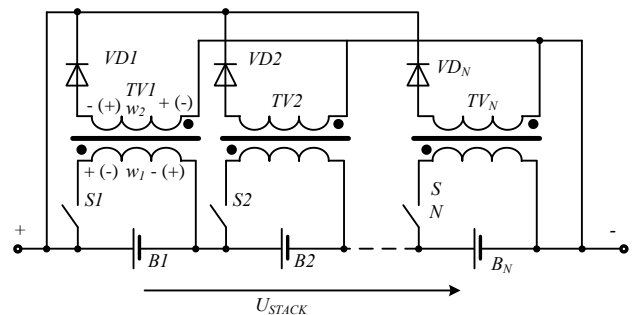


Рис. 5 – Активний балансір на основі оберненоходової топології з поверненням надлишкової енергії до стеку

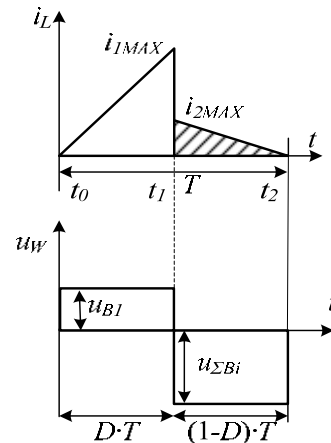


Рис. 6 – Діаграми струму та напруги на обмотках трансформатора

В момент часу t_1 виконується вимкнення ключа S1, внаслідок чого напруга на обмотках трансформатора змінює знак на протилежний (вказана в дужках). На другому такті роботи (інтервал часу $t_1 - t_2$ рис. 6) починається інтервал повернення накопиченої енергії до стека B1-BN.

Середнє значення струму i_{1AV} , що характеризує швидкість розряду акумулятора-донора на першому інтервалі роботи схеми і середнє значення струму i_{2AV} , що характеризує швидкість заряду акумуляторів стека становить, відповідно

$$i_{1AV} = \frac{i_{1MAX}}{K_\phi} = \frac{i_{1MAX}}{\sqrt{3}}, \quad (1)$$

$$i_{2AV} = \frac{i_{1MAX}}{N \cdot K_\phi} = \frac{i_{1MAX}}{N \cdot \sqrt{3}}, \quad (2)$$

де K_ϕ – коефіцієнт форми сигналу, що становить для пилкоподібного струму величину $\sqrt{3}$. З аналізу відношень (1, 2) видно, що швидкість розряду акумулятора-донора в N разів швидше ніж швидкість заряду будь-якого акумулятора стека. Це накладає обмеження на ефективну роботу схеми при розряді акумуляторів, коли існує проблема запобігання зменшення рівня напруги на акумуляторі стека за нижню границю припустимого діапазону. Оскільки на інтервалі часу $t_1 - t_2$ (рис. 6) відбувається заряд всіх акумуляторів середнім струмом величиною i_{2AV} , в тому числі, і акумулятора-донора що розряджався на попередньому такті роботи схеми, значення еквівалентного середнього значення розрядного струму має бути скорегованим на величину зарядного струму

$$i_{1AV}^* = \frac{i_{1MAX}}{\sqrt{3}} - i_{2AV} = \frac{i_{1MAX}}{\sqrt{3}} - \frac{i_{1MAX}}{N \cdot \sqrt{3}} = \frac{i_{1MAX} \cdot (N-1)}{N \cdot \sqrt{3}} \quad (3)$$

Аналіз ефективності буферних елементів в схемах активних балансирів

Як зазначалося вище, передача енергії між акумуляторами стеку за умови активного балансування, виконується за допомогою індуктивного або ємнісного буферного елемента. Розглянемо більш детально процеси, що протікають в ланцюгах передачі енергії для двох типів буферних елементів. На рис. 7 наведено спрощені схеми ланцюгів балансування (а, б) і їх операторні схеми заміщення на етапах накопичення енергії (г, е) і передачі (в, д) відповідно. На всіх схемах виконується умова $U_{B2} > U_{B1}$.

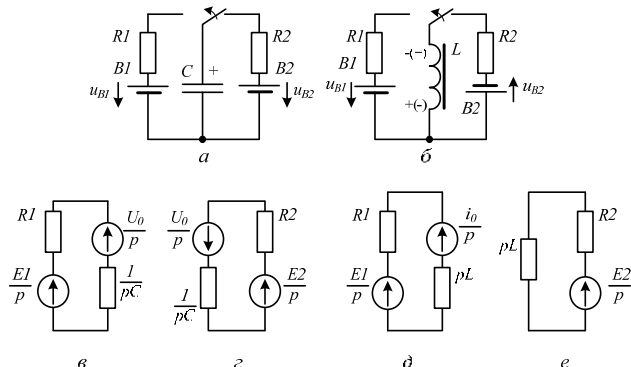


Рис. 7 – До визначення ефективності типу буферного елемента

Для схеми з ємнісним буферним елементом в сталому режимі на інтервалі накопичення енергії початкове значення напруги на буферному елементі становить U_{B1} (рис. 7, в). Тоді, операторні рівняння, що описують процеси заряду ємності описуються наступним чином

$$I_{C_c\Box} = \frac{\frac{E_2}{p} - \frac{E_1}{p}}{R_2 + \frac{1}{pC}}; \quad (4)$$

$$U_{C_c\Box} = \frac{\left(\frac{E_2}{p} - \frac{E_1}{p}\right)}{R_2 + \frac{1}{pC}}. \quad (5)$$

Після виконання зворотного перетворення Лапласа, отримаємо їхні оригінали

$$I_{C_c\Box} = \frac{e^{-\frac{t}{C \cdot R_2}} \cdot (E_2 - E_1)}{R_2}; \quad (6)$$

$$U_{C_c\Box} = -\left(e^{-\frac{t}{C \cdot R_2}} - 1\right) \cdot (E_2 - E_1) + E_2. \quad (7)$$

На інтервалі передачі енергії операторні рівняння, що описують процеси розряду ємності описуються наступним чином

$$I_{C_disc\Box} = \frac{\frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p}}{R_1 + \frac{1}{pC}}; \quad (8)$$

$$U_{C_disc\Box} = \frac{\left(\frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p}\right)}{R_1 + \frac{1}{pC}}. \quad (9)$$

Після виконання зворотного перетворення Лапласа, отримаємо їхні оригінали:

$$I_{C_disc\Box} = \frac{e^{-\frac{t}{C \cdot R_1}} \cdot (E_1 - E_2)}{R_1}; \quad (10)$$

$$U_{C_disc\Box} = E_1 - \left(e^{-\frac{t}{C \cdot R_1}} - 1\right) \cdot (E_2 - E_1). \quad (11)$$

Для схеми з індуктивним буферним елементом на інтервалі накопичення енергії початкове значення струму в буферному елементі відсутнє (рис. 7, е). Операторні рівняння, що описують процес накопичення енергії в індуктивному буферному елементі (процес зростання струму) описуються наступним чином

$$I_{L_c\Box} = \frac{\frac{E_2}{p}}{R_2 + pL}. \quad (12)$$

Після виконання зворотного перетворення Лапласа, отримаємо оригінали струму

$$I_{L_c\Box} = -\frac{E_2 \cdot \left(e^{-\frac{t \cdot R_2}{L}} - 1\right)}{R_2}. \quad (13)$$

На інтервалі передачі енергії операторне рівняння, що описує процес спадання струму індуктивності описується наступним чином

$$I_{L_disc\Box} = \frac{\left(Li_0 - \frac{E_1}{p}\right)}{R_1 + pL}. \quad (14)$$

Після виконання зворотного перетворення Лапласа, отримаємо оригінал струму індуктивного буферного елемента

$$I_{L_disc} = \frac{E1 \cdot e^{-\frac{R1 \cdot t}{L}} - E1 + R1 \cdot i_0 \cdot e^{-\frac{R1 \cdot t}{L}}}{R1} \quad (15)$$

Таким чином, струм в буферних елементі змінюється за законом

$$I_C(t) = \begin{cases} \frac{e^{-\frac{t}{C \cdot R2}} \cdot (E2 - E1)}{R2}, & \text{нпу } t \leq T/2 \\ \frac{e^{-\frac{t}{C \cdot R1}} \cdot (E1 - E2)}{R1}, & \text{нпу } t > T/2 \end{cases}; \quad (16)$$

$$I_L(t) = \begin{cases} -\frac{E2 \cdot \left(e^{-\frac{t \cdot R2}{L}} - 1 \right)}{R2}, & \text{нпу } t \leq T/2 \\ \frac{E1 \cdot e^{-\frac{R1 \cdot t}{L}} - E1 + R1 \cdot i_0 \cdot e^{-\frac{R1 \cdot t}{L}}}{R1}, & \text{нпу } t > T/2 \end{cases} \quad (17)$$

Виконаємо розрахунок ефективності застосування різних типів буферних елементів шляхом порівняння енергії, що передається за один період перетворення за умови рівності діючих значень струмів I_L, I_C .

Нехай, відбувається балансування двох $LiFePO_4$ акумуляторів з гранично припустимим рівнем розбалансування (в цьому випадку буде досягнуто максимальної ефективності ємнісного балансира). Завдаємо ємністю буферного конденсатора $C = 100$ мкФ та напругою на акумуляторах: $E1 = 2,0$ В; $E2 = 3,65$ В.

Величина енергії, що буде передаватися за один такт роботи схеми складає

$$W_C = \frac{C \cdot (E2 - E1)^2}{2} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot (3,6 - 2,0)^2}{2} = 1,36 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} \quad (18)$$

Визначимо діюче значення струму I_C

$$I_{C \text{ RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_C^2 dt} = 9,5 \text{ А} \quad (19)$$

Визначимо параметри індуктивного буферного елемента, що забезпечить те саме значення діючого струму на тій самій частоті перетворення: $I_{C \text{ RMS}} = I_{L \text{ RMS}}$.

Амплітудне значення струму в індуктивності складає

$$I_m = I_{C \text{ RMS}} \cdot \sqrt{3} = 9,5 \cdot \sqrt{3} \approx 16,5 \text{ А} \quad (20)$$

За умови рівнів напруги на акумуляторних батареях $E1 = 2,0$ В; $E2 = 3,65$ В, для роботи схеми в режимі гранично переривчастого магнітного потоку тривалість накопичення енергії в індуктивності складає

$$t_u = \frac{E1}{E1 + E2} \cdot T \text{ (с)}, \quad (21)$$

де $E1, E2$ – значення напруги на акумуляторі-донорі та акумуляторі-акцепторі відповідно; T – період перетворення, для даного прикладу становить 60 мкс.

$$t_u = \frac{2}{2 + 3,65} \cdot 60 \cdot 10^{-6} = 21 \cdot 10^{-6} \text{ (с)} \quad (22)$$

Визначимо значення буферної індуктивності L , струм в якій зростає до значення I_m за час t_u при підключенні її до джерела напруги $E2$

$$L = \frac{E2 \cdot t_u}{I_m} \text{ (Гн)}. \quad (23)$$

$$L = \frac{3,65 \cdot 21 \cdot 10^{-6}}{16,5} = 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ (Гн)} \quad (24)$$

Визначимо величину енергії, що передається за один такт роботи індуктивного балансира в розглянутому вище прикладі

$$W_L = \frac{L \cdot I_m^2}{2} = \frac{6,6 \cdot 10^{-6} \cdot 16,5^2}{2} = 9 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} \quad (25)$$

За умови прийнятого вище припущення про рівність діючих значень струму балансування та частоти перетворення, можна дати оцінку ефективності ємнісного та індуктивного буферного елемента схеми активного балансира порівнявши значення енергій W_L і W_C

$$\frac{W_L}{W_C} = \frac{9 \cdot 10^{-4}}{1,36 \cdot 10^{-4}} \approx 7 \quad (26)$$

Отримане значення характеризує ефективність застосування в схемах активного балансування індуктивного буферного елемента в порівнянні з ємнісним. При зменшенні величини розбалансування акумуляторів $B1, B2$ відношення (26) значно збільшується, і досягає свого максимального значення (близько 1000) за умови $U_{B1} \approx U_{B2} \approx (U_{MAX} = 3,65 \text{ В})$. Окрім зазначеного вище критерію, слід звернути увагу і на форми зарядного і розрядного струмів при використанні ємнісного та індуктивного буферних елементів.

Амплітудне значення струму у схемах з ємнісним буферним елементом (рис. 8) обмежене лише внутрішніми паразитними опорами елементів схеми, тому, при відносно великому значенні розбалансування, в елементах схеми (в тому числі акумуляторних батареях) виділяється значна величина енергії втрат у вигляді теплової енергії, що негативно позначається на параметрах акумуляторної батареї.

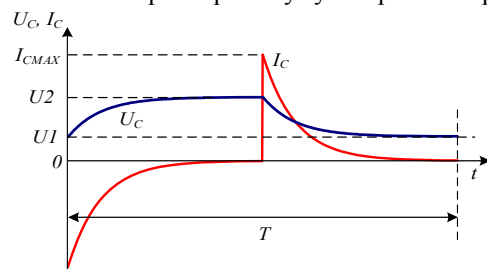


Рис. 8 – Машинограми форми струму та напруги буферного конденсатора

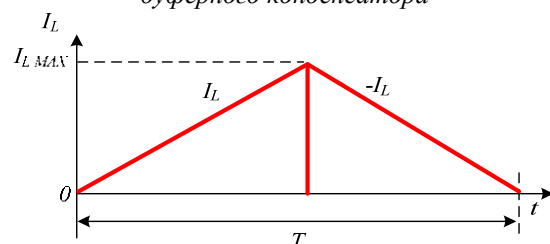


Рис. 9 – Машинограми форми струму буферної індуктивності

Амплітудне значення струму в схемі на основі індуктивних буферних елементів (рис. 9) обмежене величиною індуктивності. Воно може бути розраховане на етапі проектування пристрою. Крім того, забезпечення системою корування переривчастого режиму роботи перетворювача дозволяє зменшити комутаційні втрати в силових ключах схеми і дозволяє підвищити ефективність роботи в цілому.

Висновки

Безпека використання електрохімічних накопичувачів вимагає застосування спеціалізованих балансуєчих пристроїв. Найбільш ефективними, з енергетичної точки зору, є системи активного балансування. Аналіз математичної моделі роботи двох типів буферних елементів (ємнісного та індуктивного) дозволив дати якісну оцінку їх ефективності. Перші, в порівнянні з індуктивними - не тільки мають гірші енергетичні характеристики, але і не дозволяють виконувати «масштабування» пристрою без істотного ускладнення системи управління.

При великій кількості накопичувачів (більше трьох) слід віддати перевагу трансформаторним системам балансування, як окремого випадку індуктивної топології.

Список літератури

1. Sokol Y., Ivakhno V., Zamaruev V., Styslo B. Full Soft Switching Dual DC/DC Converter With Four-Quadrant Switch for Systems With Battery Energy Storage System. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine, 2018. pp. 155-160. doi: 10.1109/IEPS.2018.8559490.
2. Sokol E., Zamaruev V., Kryvosheev S., Styslo B., Makarov V. The specificity of electrical energy storage unit application. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Kiev, 2017. pp. 432-435. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100524.
3. A123 Automotive Lithium-ion Solutions. URL: <http://www.a123systems.com/>
4. Lindemark B. Individual cell voltage equalizers (ICE) for reliable battery performance. *IEEE 13th International Telecommunication Energy Conference*. Kyoto, Japan, 1991. P. 196-201. doi: 10.1109/INTLEC.1991.172396.
5. Stuart A.T. Fast equalization for large lithium ion batteries. *IEEE Aerospace Electron. Syst. Mag.* 2009. Vol. 24. No 7. P. 27-31. doi: 10.1109/OCEANS.2008.5152122.
6. Zhang X., Liu P., Wang D. The design and implementation of smart battery management system balance technology. *J. Conver. Inf. Technol.* 2011. Vol. 6. № 5. P. 108-116. doi: 10.4156/JCIT.VOL6.ISSUE5.12.
7. Pascual C., Krein P.T. Switched capacitor system for automatic series battery equalization. *IEEE Applied Power Electronic Conference*. 1997. P.848-854. doi: 10.1109/APEC.1997.575744.
8. Hong-Sun P., Chol-Ho K., Ki-Bum P. et al. Design of a charge equalizer based on battery modularization. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2009. V.58. No.7. P. 3938-3946. doi: 10.1109/TVT.2009.2015331.
9. Baughman A.C., Ferdowsi M. Double-tiered switched-capacitor battery charge equalization technique. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008. V.55. No.7. P. 2277-2285. doi: 10.1109/TIE.2008.918401.
10. Yuanmao Y., Cheng K.W.E., Yeung Y.P.B. Zero current switching switched capacitor zero voltage gap automatic equalization system for series battery string. *IEEE Trans. Power Electron.* 2012. V.27. No7. P.3234-3242. doi: 10.1109/TPEL.2011.2181868.
11. Park H.S., Kim C.E., Kim C.H., Moon G.W. A modularized charge equalizer for an HEV lithium-ion battery string. *IEEE Trans. Power Electron.* 2009. V.56. No.5. P. 1464-1476. doi: 10.1109/TIE.2009.2012456.
12. Kim M.Y., Kim C.H., Cho S.Y., Moon G.W. A cell selective charge equalizer using multi-output converter with auxiliary transformer. *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, Jeju, 2011. P. 310-317. doi: 10.1109/ICPE.2011.5944610.
13. Nishijima K., Sakamoto H., Harada K. PWM controlled simple and high performance battery balancing system. *IEEE Power Electron. Spec. Conf.* 2000. P. 517-520. doi: 10.1109/PESC.2000.878916.
14. Cassani P.A., Williamson S. Design, testing and validation of a simplified control scheme for a novel plug-in hybrid electric vehicle battery cell equalizer. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010. V.57. No.12. P.3956-3962. doi: 10.1109/TIE.2010.2050750.
15. Moo C., Ng K.S., Hsieh Y. Parallel operation of battery power modules. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2008. V.23. No.2. P.701-707. doi: 10.1109/TEC.2007.914310.
16. Park H.S., Kim C.E., Kim C.H., Moon G.W. A Modularized Charge Equalization Converter for a Hybrid Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Stack. *Journal of Power Electronics*. 2007. V.7. N.4. P. 343-351. doi: 10.1109/TIE.2009.2012456.
17. Kim M.Y., Kim C.H., Cho S.Y., Moon G.W. A cell selective charge equalizer using multi-output converter with auxiliary transformer. *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, Jeju, 2011. P. 310-317. doi: 10.1109/ICPE.2011.5944610.
18. Pham V.L., Duong V.T., Choi W. A low cost and fast cell-to-cell balancing circuit for lithium-ion battery strings. *IEEE Power Electron. Spec. Conf.* 2000. P. 517-520. doi: 10.3390/electronics9020248.
19. Zhang M., Li B., Hang L., Tolbert L.M., Lu Z. Digitized feedforward compensation method for high power density three-phase VIENNA PFC converter. *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 2010. V. 57. No.12. P. 3956-3962. doi: 10.1109/APEC.2012.6165959.
20. Hopkins D.C., Mosling C.R., Hung S.T. Dynamic equalization during charging of serial energy storage elements. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1993. V.29. No.2. P. 363-368. doi: 10.1109/28.216545.
21. Rashid M.H. *Power electronics handbook: devices, circuits and applications handbook*. Elsevier Inc, 2011. doi: 10.1016/B978-0-12-088479-7.X5018-4.
22. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. V.1. No8. P. 6-16. doi: 10.15587/1729-4061.2021.225327.
23. Kim H.S., Park K.B., Park S.H. et al. A new two-switch flyback battery equalizer with low voltage stress on the switches. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. San Jose, CA, 2009. P.511-516. doi: 10.1109/ECCE.2009.5316333.
24. Yang D., Li S., Qi G. A bidirectional flyback cell equalizer for series-connected lithium iron phosphate batteries. *6th International Conference on Power Electronics Systems and*

- Applications*. Hong Kong, 2015. P.1-5. doi: 10.1109/PESA.2015.7398904.
25. Hoque M.M., Hannan M.A., Mohamed A. Optimal algorithms for the charge equalisation controller of series connected lithium-ion battery cells in electric vehicle applications. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2017. V.7. No.4. P.267-277. doi: 10.1109/PESA.2015.7398904.
 26. Park J.H., Kim K.T. Multi-output differential power processing system using boost-flyback converter for voltage balancing. *International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing*. Da Nang, 2017. P.139-142. doi: 10.1109/SIGTELCOM.2017.7849811.
 27. Hoque M.M., Hannan M.A., Mohamed A. Optimal algorithms for the charge equalisation controller of series connected lithium-ion battery cells in electric vehicle applications. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2017. V.7. No.4. P. 267-277. doi: 10.1049/iet-est.2016.0077.
- References (transliterated)**
1. Sokol Y., Ivakhno V., Zamaruiev V., Styslo B. Full Soft Switching Dual DC/DC Converter With Four-Quadrant Switch for Systems With Battery Energy Storage System. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 155-160, doi: 10.1109/IEPS.2018.8559490.
 2. Sokol E., Zamaruiev V., Kryvosheev S., Styslo B., Makarov V. The specificity of electrical energy storage unit application, *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, 2017, pp. 432-435, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100524.
 3. A123 Automotive Lithium-ion Solutions. Available at: <http://www.a123systems.com/>
 4. Lindemark B. Individual cell voltage equalizers (ICE) for reliable battery performance, *IEEE 13th International Telecommunication Energy Conference*, Kyoto, Japan, 1991, pp. 196–201, doi: 10.1109/INTLEC.1991.172396.
 5. Stuart A.T. Fast equalization for large lithium ion batteries, *IEEE Aerospace Electron. Syst. Mag.*, 2009, Vol. 24, No 7, pp. 27–31, doi: 10.1109/OCEANS.2008.5152122.
 6. Zhang X., Liu P., Wang D. The design and implementation of smart battery management system balance technology, *J. Conver. Inf. Technol.*, 2011, Vol. 6, 5, pp. 108–116, doi: 10.4156/JCIT.VOL6.ISSUE5.12.
 7. Pascual C., Krein P.T. Switched capacitor system for automatic series battery equalization, *IEEE Applied Power Electronic Conference*, 1997, 848–854, doi: 10.1109/APEC.1997.575744.
 8. Hong-Sun P., Chol-Ho K., Ki-Bum P. et al. Design of a charge equalizer based on battery modularization, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2009, V.58, No.7, pp. 3938-3946, doi: 10.1109/TVT.2009.2015331.
 9. Baughman A.C., Ferdowsi M. Double-tiered switched-capacitor battery charge equalization technique, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2008, V.55, No7, pp. 2277–2285, doi: 10.1109/TIE.2008.918401.
 10. Yuanmao Y., Cheng K.W.E., Yeung Y.P.B. Zero current switching switched capacitor zero voltage gap automatic equalization system for series battery string, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2012, V.27, No7, pp. 3234–3242, doi: 10.1109/TPEL.2011.2181868.
 11. Park H.S., Kim C.E., Kim C.H., Moon G.W. A modularized charge equalizer for an HEV lithium-ion battery string, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2009, V.56, No5, pp. 1464–1476, doi: 10.1109/TIE.2009.2012456.
 12. Kim M.Y., Kim C.H., Cho S.Y., Moon G.W. A cell selective charge equalizer using multi-output converter with auxiliary transformer, *8th International Conference on Power Electronics – ECCE, Asia, Jeju*, 2011, pp. 310-317, doi: 10.1109/ICPE.2011.5944610.
 13. Nishijima K., Sakamoto H., Harada K. PWM controlled simple and high performance battery balancing system, *IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, 2000, pp. 517–520, doi: 10.1109/PESC.2000.878916.
 14. Cassani P.A., Williamson S. Design, testing and validation of a simplified control scheme for a novel plug-in hybrid electric vehicle battery cell equalizer, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2010, V.57, No12, pp.3956-3962, doi: 10.1109/TIE.2010.2050750.
 15. Moo C., Ng K.S., Hsieh Y. Parallel operation of battery power modules, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2008, V.23, No2, pp.701–707, doi: 10.1109/TEC.2007.914310.
 16. Park H.S., Kim C.E., Kim C.H., Moon G.W. A Modularized Charge Equalization Converter for a Hybrid Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Stack, *Journal of Power Electronics*, 2007, V.7, N4, pp. 343-351, doi: 10.1109/TIE.2009.2012456.
 17. Kim M.Y., Kim C.H., Cho S.Y., Moon G.W. A cell selective charge equalizer using multi-output converter with auxiliary transformer, *8th International Conference on Power Electronics – ECCE, Asia, Jeju*, 2011, pp. 310-317, doi: 10.1109/ICPE.2011.5944610.
 18. Pham V.L., Duong V.T., Choi W. A low cost and fast cell-to-cell balancing circuit for lithium-ion battery strings, *IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, 2000, pp. 517–520, doi: 10.3390/electronics9020248.
 19. Zhang M., Li B., Hang L., Tolbert L.M., Lu Z. Digitized feedforward compensation method for high power density three-phase VIENNA PFC converter, *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2010, V.57, No12, pp.3956–3962, doi: 10.1109/APEC.2012.6165959.
 20. Hopkins D.C., Mosling C.R., Hung S.T. Dynamic equalization during charging of serial energy storage elements, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1993, V.29, No2, pp. 363–368, doi: 10.1109/28.216545.
 21. Rashid M.H. *Power electronics handbook: devices, circuits and applications handbook*, Elsevier Inc, 2011, doi: 10.1016/B978-0-12-088479-7.X5018-4.
 22. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, V.1, No8, pp. 6-16, doi: 10.15587/1729-4061.2021.225327.
 23. Kim H.S., Park K.B., Park S.H. et al. A new two-switch flyback battery equalizer with low voltage stress on the switches, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose, CA, 2009, pp.511-516, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316333.
 24. Yang D., Li S., Qi G. A bidirectional flyback cell equalizer for series-connected lithium iron phosphate batteries, *6th International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, Hong Kong, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESA.2015.7398904.
 25. Hoque M.M., Hannan M.A., Mohamed A. Optimal algorithms for the charge equalisation controller of series connected lithium-ion battery cells in electric vehicle applications, *IET Electrical Systems in Transportation*, 2017, V.7, No4, pp.267-277, doi: 10.1109/PESA.2015.7398904.
 26. Park J.H., Kim K.T. Multi-output differential power processing system using boost-flyback converter for voltage balancing, *International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing*, Da Nang, 2017, pp. 139-142, doi: 10.1109/SIGTELCOM.2017.7849811.
 27. Hoque M.M., Hannan M.A., Mohamed A. Optimal algorithms for the charge equalisation controller of series connected lithium-ion battery cells in electric vehicle applications, *IET Electrical Systems in Transportation*, 2017, V.7, No4, pp. 267-277, doi: 10.1049/iet-est.2016.0077.

Відомості про авторів (About authors)

Стисло Богдан Олександрович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової та біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-7057-3523; e-mail: bohdan.styslo@khp.edu.ua.

Bohdan Styslo – Ph. D., Associate Professor Industrial and Biomedical Electronics Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: bohdan.styslo@khp.edu.ua.

Зайцев Роман Валентинович – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2286-8452; e-mail: roman.zaitsev@khp.edu.ua.

Roman Zaitsev – Doctor of Engineering Science, Docent, Head of Department, Materials for Electronics and Solar Cells Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: roman.zaitsev@khp.edu.ua.

Мінакова Ксенія Олександрівна – кандидат фізико-математичних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8869-1082; e-mail: minakova_kseniia@khp.edu.ua.

Kseniia Minakova – Ph. D., Associate Professor, Senior Researcher of Materials for Electronics and Solar Cells Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv, Ukraine; e-mail: minakova_kseniia@khp.edu.ua.

Кіриченко Михайло Валерійович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-4847-506X; e-mail: mykhailo.kirichenko@khp.edu.ua.

Mykhailo Kirichenko – Ph. D., Associate Professor of Materials for Electronics and Solar Cells Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv, Ukraine; e-mail: mykhailo.kirichenko@khp.edu.ua.

Ересько Олександр Вячеславович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової та біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-7067-3273; e-mail: oleksandr.eresko@khp.edu.ua.

Oleksandr Eresko – Ph. D., Associate Professor Industrial and Biomedical Electronics Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: oleksandr.eresko@khp.edu.ua.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Стисло Б. О., Зайцев Р. В., Мінакова К. О., Кіриченко М. В., Ересько О. В. Аналіз ефективності схем активного балансування акумуляторних батарей. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 38-45. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.06.

Please cite this article as:

Styslo B., Zaitsev R., Minakova K., Kirichenko M., Eresko O. Analysis of batteries active balance schemes efficiency. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 38-45, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.06.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Стысло Б. А., Зайцев Р. В., Минакова К. А., Кириченко М. В., Ересько А. В. Анализ эффективности схем активного балансирования аккумуляторных батарей. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 38-45. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.06.

АННОТАЦІЯ В роботі проведено огляд існуючих схемних рішень пристроїв для балансування акумуляторних батарей. Описано принципи балансування на основі ємкостного і індуктивного буферного елемента. Показано особливості їх роботи і основні розрахунки кожного з типів пристроїв. Для схем з трансформаторної топологією вказано розрахункові значення для визначення балансуємого струму. На основі аналізу схемних рішень, чисельно визначено і доведено ефективність використання схемних рішень на основі індуктивних буферних елементів. Моцні акумуляторні батареї для систем електроживлення використовуються в формі стеків, що складаються з послідовно-паралельного з'єднання єдиничних накопичувачів. В час їх експлуатації виникає проблема нерівномірного розряду або заряду, для компенсації якої необхідно виконувати балансування рівнів напруги в акумуляторах стека. Безпека використання електрохімічних накопичувачів вимагає застосування спеціалізованих балансуємих пристроїв. Найбільш ефективними, з енергетичної точки зору, є системи активної балансування. Аналіз математичної моделі роботи двох типів буферних елементів (ємкостного і індуктивного) дозволив дати якісну оцінку їх ефективності. Перше, порівняно з індуктивними - не тільки має менші енергетичні характеристики, але і не дозволяє виконувати «масштабування» пристроїв без суттєвого ускладнення системи управління. Амплітудне значення струму в схемах з ємкостним буферним елементом обмежено тільки внутрішніми паразитними опорами елементів схеми, тому, при відносно великому значенні розбалансування, в елементах схеми (в тому числі акумуляторних батарей) виділяється значительна кількість енергії в формі теплової енергії, що негативно впливає на параметри акумуляторної батареї. Амплітудне значення струму в схемі на основі індуктивних буферних елементів обмежено величиною індуктивності. Воно може бути розраховано на етапі проектування пристроїв. Крім того, забезпечення системою управління прерывистого режиму роботи преобразувача дозволяє зменшити комутаційні втрати в силових ключах схеми і підвищує ефективність роботи в цілому. При великому кількості накопичувачів (більше трьох) слід віддати перевагу трансформаторним системам балансування, як частини випадку індуктивної топології.

Ключові слова: накопичувач енергії; акумуляторна батарея; балансування; схемне рішення; буферний елемент; режими роботи, ефективність

Надійшла (received) 18.04.2021

УДК 621.1.016.4: 621.1.016.7

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.07

ФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ТЕПЛОВОЇ СХЕМИ ТЕЦ З СУПЕРКРИТИЧНИМ ПАРОВИМ ЦИКЛОМ НА ОСНОВІ ЕКСЕРГЕТИЧНОГО МЕТОДУ

В. О. ТАРАСОВА

Відділ моделювання та ідентифікації теплових процесів, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгоного НАН України, м. Харків, УКРАЇНА
e-mail: tarasova@ipmach.kharkov.ua

АНОТАЦІЯ Найбільш перспективним напрямом модернізації ТЕЦ є впровадження енергоблоків на суперкритичних параметрах пари (СКП). Підвищення параметрів пари – це один з найбільш ефективних способів збільшення ККД ТЕЦ. Таким чином, розробка концепції створення теплових схем турбоустановок на СКП з урахуванням особливостей їх експлуатації на діючих ТЕЦ України є актуальною науковою проблемою. Вирішення цієї проблеми дозволить виконати заміну або модернізацію енергогенеруючого обладнання, що спрацювало свій ресурс, на сучасні енергоблоки, які відповідають світовим стандартам з економічності та екологічності. У статті адаптовано метод ексергетичного аналізу до дослідження теплових схем ТЕЦ з суперкритичним паровим циклом. Як приклад застосування методу проведено ексергетичний аналіз енергоустановки, що працює за одноступеневою тепловою схемою. У рамках запропонованого методу створено термодинамічну, а також тополого-ексергетичну модель енергоустановки. На основі тополого-ексергетичної моделі визначено показники термодинамічної ефективності енергоустановки, яка працює за суперкритичним паровим циклом. Запропоновано застосовувати теорію планування експерименту в ексергетичному аналізі теплової схеми ТЕЦ. Із залученням цієї теорії проведено багатофакторний чисельний експеримент по визначенню впливу на ексергетичну ефективність теплової схеми ТЕЦ основних визначальних варіюваних факторів, таких як адіабатні та теплотехнічні ККД елементів установки, а також режимні параметри її роботи. Отримано узагальнене рівняння функціонального взаємозв'язку ексергетичного ККД системи та ексергетичних ККД елементів теплової схеми ТЕЦ. Запропоноване рівняння може бути використане в якості інструментарію для подальшого навчання нейронних мереж та застосування їх як при проектуванні, так і при діагностиці енергетичної ефективності роботи ТЕЦ. За результатами факторного аналізу виявлено досить високу консервативність розглянутої одноступеневої схеми ТЕЦ до зміни варіюваних параметрів. Це свідчить про наявність досить жорстких структурних зв'язків між елементами теплової схеми, що в цілому є позитивним аспектом при її реконструкції.

Ключові слова: ексергетичний метод; суперкритичний паровий цикл; суперкритичні параметри пари; факторний аналіз; потокові графи; тополого-ексергетична модель; ТЕЦ

FACTOR ANALYSIS OF THE THERMAL SCHEME OF CHP WITH SUPER CRITICAL STEAM CYCLE ON THE BASIS OF EXERGY METHOD

V. TARASOVA

Department of Modeling and Identification of Thermal Processes, A. M. Podgorny Institute Problem in Machinery of NAS of Ukraine, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The most promising direction of CHP modernization is the introduction of power units on supercritical steam parameters. Increasing steam parameters is one of the most effective ways to increase the efficiency of a CHP plant. Thus, the development of the concept of thermal schemes turbines for supercritical steam parameters, taking into account the characteristics of their operation at the existing CHP Ukraine is an actual scientific problem. The solution to this problem will make it possible to replace or modernize the power generating equipment that has exhausted its resource with modern power units that meet world economic and environmental standards. The method of exergy analysis is adapted to the study of thermal schemes of CHP plants with supercritical steam cycle. As an example of application of a method the exergy analysis of the power plant working on the one-stage thermal scheme is carried out. Within the framework of the proposed method, a thermodynamic and topology-exergetic model of the power plant is created. Based on the topology-exergetic model the indicators of thermodynamic efficiency of the power plant operating on supercritical parameters of steam are determined. It is proposed to apply the theory of experiment planning in exergy analysis of the thermal circuit of a CHP. With the involvement of this theory, a multifactor numerical experiment was conducted to determine the impact on the exergetic efficiency of the thermal scheme of CHP of the main determining variable factors, such as adiabatic and thermal efficiency of the plant, as well as the operating parameters. The generalized equation of functional interrelation of exergetic efficiency of system and exergetic efficiency of elements of thermal scheme of CHP is received. The proposed equation can be used as a tool for further training of neural networks and their application both in the design and in the diagnosis of energy efficiency of CHP. According to the results of the factor analysis, a rather high conservatism of the considered one-stage scheme of CHP to the change of the varied parameters was revealed. This indicates the presence of more rigid structural links between the elements, which is generally a positive aspect of the reconstruction.

Keywords: exergy method; supercritical steam cycle; supercritical parameters of steam; factor analysis; flow graphs; topology-exergetic model; CHP

Вступ

Актуальною проблемою сучасної енергетики України є переведення діючих енергогенеруючих

потужностей ТЕЦ на роботу при суперкритичних параметрах пари. Така реконструкція ТЕЦ може продовжити терміни експлуатації діючих

парогенераторів, поліпшити екологічні та економічні показники. Теплова потужність енергоблоків при переведенні їх на суперкритичні параметри циклу може зрости майже на 6–7 % (відносних), що дуже істотно. Наразі типовий діапазон суперкритичних параметрів складає від 245 бар до 285 бар при температурі від 540 °С до 596 °С. Подальше збільшення діапазонів режимів експлуатації, обумовлених введенням нових технологій і типів енергообладнання, вимагає докорінного перегляду підходів до якості проектування теплових схем. Відомо, що на розробку ТЕЦ витрачаються величезні кошти, тому в сучасних економічних умовах необхідно розвивати і вдосконалювати прогресивні методи аналізу і прийняття рішень при проектуванні теплових схем енергоперетворюючих систем.

Аналіз літератури і постановка задачі дослідження

При аналізі доцільності проведення реконструкції теплової схеми ТЕЦ необхідно враховувати, що робота замінного обладнання визначається ефективністю не тільки основних, але і допоміжних елементів енергоблоку. Енергоблоки складаються з великого числа елементів, залежності між якими завжди складні. При цьому важливі не тільки параметри всередині енергоблоку, а й аналіз усіх можливих видів взаємодій потоків енергії на границях системи.

Одним з ефективних методів аналізу теплових схем є ексергетичний метод, який базується на використанні концепції ексергії [1–4]. Основою ексергетичного методу є оцінка стану енерготехнологічної системи в цілому і окремих її елементів за допомогою узагальненої термодинамічної характеристики (ексергії), що забезпечує кінцевий цільовий ефект. Метод дозволяє врахувати термодинамічну досконалість робочих процесів і вказати шляхи скорочення економічних витрат при створенні і експлуатації системи. Потоки ексергії є носіями вартості робочих процесів при отриманні корисного ефекту установки, а втрати ексергії, також як і економічні витрати, призводять до зростання вартості ексергії по ходу процесу перетворення енергії від точки введення в систему до отримання кінцевого продукту. Як відомо [5–7], у будь-якій енергоперетворюючій системі завжди існує елемент (або сукупність елементів), зміна термодинамічних втрат в якому найбільшою мірою позначається на ефективності системи в цілому. Наприклад, у енергоблоках з суперкритичними параметрами пари – це котлоагрегати [8,9].

З використанням ексергетичного методу комплексно можуть вирішуватися такі завдання, як термoeкономічна оптимізація енергоблоку або його підсистем, визначення раціональних умов функціонування, питання розподілу витрат між елементами енергоблоку.

Використовуючи ексергетичний підхід до проектування можна вибирати варіювані фактори,

зміна яких вирішальним чином впливає на ефективність системи. Таким чином вирішується завдання пошуку «вузького місця» в системі, де зростання витрат на одиницю ексергії відбувається особливо різко. Це дозволяє істотно звужити область варіації параметрів при пошуку раціональних технічних рішень по реконструкції елементів теплової схеми, що створює передумови для побудови еволюційних алгоритмів синтезу енергоперетворюючих систем. Тут виникає важливе завдання вибору стратегії розвитку виробничої енергосистеми.

Наразі в інженерну практику впроваджуються різні методи проектування складних технічних систем на основі застосування ексергетичного підходу [10,11]. Їх можна згрупувати у два класи: алгебраїчні і чисельні методи. Всі вони базуються на використанні термoeкономічних моделей або тополого-ексергетичних моделей, що сформовані зі складного набору лінійних рівнянь для визначення ексергетичного продукту кожного елемента системи. Серед алгебраїчних методів можна виділити: теорію ексергетичної вартості, теорію середніх витрат, метод вартісних ексергетичних витрат і модифікований продуктивний структурний аналіз [12–15]. До чисельних методів можна віднести термoeкономічний функціональний аналіз та інженерний-функціональний аналіз [9,16].

Серед авторів, які зробили істотний внесок у розвиток ексергетичного методу аналізу щодо застосування його у техніко-економічних розрахунках можна відзначити роботи А. І. Андрющенко, В. М. Бродянского, Ю. М. Хлебалина, Г. Н. Ноздренко [16–18]. Ними розроблені підходи, методи і алгоритми ексергетичного аналізу енергоперетворюючих систем, методики моделювання ексергетичних зв'язків і потоків витрат між енергоагрегатом і енергосистемами енергоблоків.

Разом із тим розроблені методи або спрощено, або взагалі не враховують вплив зворотних зв'язків при моделюванні потоків ексергії в теплових схемах енергоперетворюючих установок. Тим часом відомо [18], що внутрішні зв'язки і взаємодії підсистем в технічних системах, зворотні зв'язки в системах роблять будь-які, навіть лінійні задачі, нелінійними, так як підсистеми всередині системи впливають аналогічно тому, як наслідок впливає на причину. При проведенні ексергетичного аналізу найчастіше залишається без розгляду важливе питання: вплив якого фактору викликає безпосереднє зміну ексергетичних втрат в елементі, а який фактор надає непрямий вплив на ексергетичні втрати, оскільки не асоціюється з даним елементом?

Для аналізу чутливості схеми до зміни режимно-конструктивних параметрів використовуються структурні коефіцієнти, запропоновані в роботі [19]. Тим часом вони дають спрощену оцінку чутливості схеми. За допомогою структурних коефіцієнтів досліджується ефект одного

фактора і не враховується ефект взаємодії декількох факторів. У той же час відомо, що ефект одного фактора залежить від того, на якому рівні знаходиться інший фактор. Причому з ростом числа факторів число їх можливих взаємодій в системі значно зростає. Тому судити про те, чи є зміна будь-якого фактора позитивною в плані підвищення ефективності, можна лише відносно деяких окремих елементів схеми.

Визначення ефекту взаємодії факторів в теплових схемах ТЕЦ дозволить виявити приховані резерви для підвищення ефективності всієї системи. В цьому випадку розкриваються більш глибокі «кореневі» зв'язки між елементами, що дає можливість однозначно визначити пріоритетність заміни того чи іншого елемента при модернізації системи. Отримана в результаті інформація може служити основою для розробки технічних умов для проєктування і створення енергоблоків, організації їх управління, виявлення шляхів економії палива.

Метою даної частини роботи є розробка методики ексергетичного аналізу теплової схеми ТЕЦ, яка враховує взаємозв'язок ексергетичної цільової функції від ексергетичних ККД елементів.

Серед задач дослідження можна виокремити дві.

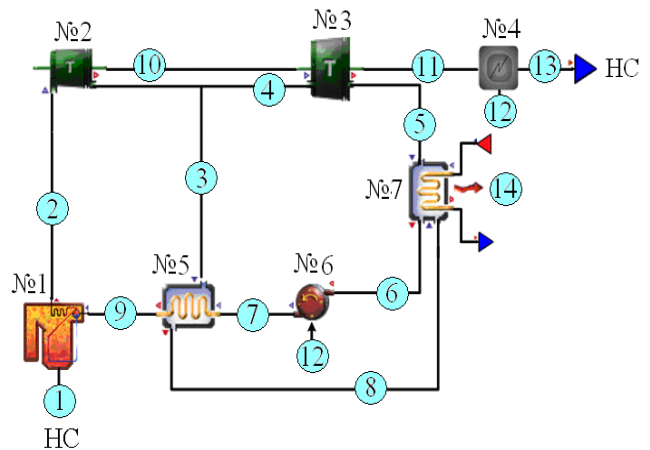
Перша задача – розробка термодинамічної та тополого-ексергетичної моделей енергоустановки.

Друга задача – знаходження функціональної залежності у вигляді регресійних рівнянь взаємозв'язку ексергетичної цільової функції від ексергетичних ККД елементів схеми ТЕЦ. Отримання регресійного рівняння взаємозв'язку ексергетичного ККД всієї системи і ексергетичних ККД елементів теплової схеми ТЕЦ. Встановлення залежності ексергетичної ефективності від контрольованих параметрів обладнання (наприклад, тиск, температура), а також показників теплотехнічної та ізоентропної ефективності обладнання.

Термодинамічна модель енергоустановки

Розглянемо одноступінчасту теплову схему ТЕЦ (рис. 1). На рисунку наведено індексацію ексергетичних потоків (цифри у колі), а також нумерацію елементів: №1 – котел, №2 – частина турбіни високого тиску (ВТ), №3 – частина турбіни низького тиску (НТ), №4 – електричний генератор, №5 – проміжний теплообмінник, №6 – насос конденсатора, №7 – конденсатор.

При розробці термодинамічної моделі енергоустановка розглядається на кожному етапі розрахунків як система, що знаходиться в стаціонарному стані. Всі без винятку її параметри, а саме масові витрати, температури та тиск вважаються постійними. Розраховуються такі параметри, як ентальпії потоків та ентропії. Як варійовані параметри можуть задаватися ізоентропні ККД, електричні ККД і теплотехнічні ККД обладнання схеми, теплота згоряння палива, а також величини охолодження і нагрівання потоків в проміжному теплообміннику.



НС – навколишнє середовище

Рис. 1 – Теплова схема ТЕЦ

Розглянемо рівняння термодинамічної моделі за основними елементами:

1. Котел.

Рівняння теплового балансу котла –

$$M_2 \cdot H_2 = H_1 \cdot M_1 + M_9 \cdot H_9,$$

де M – масова витрата; H – ентальпія.

Втрати тиску у котлі можна записати $\Delta P_{\text{котл}}$ як

$$\Delta P_{\text{котл}} = P_9 - P_2,$$

у першому наближенні $\Delta P_{\text{котл}} = 5$ бар.

Теплопродуктивність котла визначається як

$$Q_{\text{котл}} = H_1 \cdot M_1 = PCS \frac{\eta_{\text{котл}}}{100} M_1,$$

де PCS – теплота згоряння палива; $\eta_{\text{котл}}$ – теплотехнічний ККД котла.

За ентальпією робочого тіла (пари) та тиску P_2 на виході з котлоагрегату знаходиться температура пари T_2 ;

2. Частина турбіни високого тиску.

Температура робочої речовини на виході з турбіни дорівнює

$$T_4 = T_2 \left\{ 1 - \eta_{\text{втр}}^{\text{турб}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_4} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right] \right\},$$

де γ – показник адиабати процесу розширення у турбіні.

Тиск, температура, ентальпія та ентропії потоків пари у лініях 3 та 4 після турбіни високого тиску рівні, а саме: $P_4 = P_3$, $T_4 = T_3$, $H_4 = H_3$,

$S_4 = S_3$. При цьому баланс масових витрат записується як

$$M_2 = M_4 + M_3.$$

Адіабатний ККД частини турбіни ВТ у відсотках визначається за залежністю

$$\eta_{\text{вт}}^{\text{турб}} = \left[\frac{H_2 - H_4}{H_2 - H_{4S}} \right] \cdot 100,$$

де H_{4S} – ентальпія пари при параметрах $P_4, S_4 = S_2$.

Потужність частини турбіни високого тиску знаходиться як

$$W_{\text{вт}}^{\text{турб}} = M_2 \cdot (H_2 - H_4);$$

3. Частина турбіни низького тиску.

Температура робочої речовини на виході з газової турбіни дорівнює

$$T_5 = T_4 \left\{ 1 - \eta_{\text{вт}}^{\text{турб}} \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_5} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right] \right\}.$$

де адіабатний ККД частини турбіни НТ у відсотках –

$$\eta_{\text{нт}}^{\text{турб}} = \left[\frac{H_4 - H_5}{H_4 - H_{5S}} \right] \cdot 100,$$

а ентальпія пари у ідеальному циклі H_{5S} знаходиться при параметрах пари $P_5, S_5 = S_4$.

Потужність частини турбіни низького тиску визначається за формулою

$$W_{\text{нт}}^{\text{турб}} = M_4 \cdot (H_4 - H_5),$$

де масові витрати пари $M_5 = M_4$;

4. Конденсатор.

Тепловий потік відведений від конденсатора дорівнює

$$Q_{\text{конд}} = M_5 \cdot H_5 + M_8 \cdot H_8 - M_6 \cdot H_6,$$

де $M_6 = M_5 + M_8$. Тиск в лініях 5 та 6 рівний $P_5 = P_6$;

5. Насос конденсатора.

Потужність насоса визначається як

$$W_{\text{нас}} = M_6 \cdot (H_7 - H_6),$$

де масова витрата води $M_6 = M_7$.

Ентальпію води на виході з насоса H_7 можна визначити з виразу ККД насоса у відсотках, який визначається як

$$\eta_{\text{нас}} = \frac{H_{7S} - H_6}{H_7 - H_6} \cdot 100,$$

де H_{7S} – ентальпія води після насоса без врахування втрат від незворотності.

6. Проміжний теплообмінник.

Масові витрати робочого тіла в теплообміннику $M_7 = M_9$, $M_3 = M_8$, при цьому $P_3 = P_8$.

Тепловий баланс у проміжному теплообміннику можна представити у наступному вигляді:

$$M_3 \cdot H_3 + M_7 \cdot H_7 = M_8 \cdot H_8 + M_9 \cdot H_9,$$

де H_8 – ентальпія води; H_9 – ентальпія пари.

Охолодження в проміжному теплообміннику дорівнює

$$TT_D = T_3 - T_9,$$

а нагрівання води в проміжному теплообміннику

$$A_E = T_8 - T_7;$$

7. Генератор.

Електричний ККД генератора можна записати як

$$\frac{\eta_{\text{ген}}^{\text{ел}}}{100} = \frac{W_{\text{ел}} + W_{\text{нас}}}{W_{\text{нт}}^{\text{турб}} + W_{\text{вт}}^{\text{турб}}}.$$

З цього рівняння можна визначити електричну потужність енергоустановки $W_{\text{ел}}$;

Ексергія i -го потоку ($i = 2$ по 9) визначається за формулою

$$E_i = M_i \cdot (H_i - H_0 - ((T_0 - 273,15) \cdot (S_i - S_0))),$$

Індексацію потоків показано на рис. 1. Тиск та температура навколишнього середовища дорівнює $P_0 = 1,013$ бар; $T_0 = 20$ °C.

Ексергія 1-го потоку дорівнює $E_1 = Q_{\text{котл}}$, а ентропія – $S_1 = 0$.

Ексергії потоків з 10-го по 13-й можна записати як $E_{10} = W_{\text{вт}}^{\text{турб}}$, $E_{11} = W_{\text{нт}}^{\text{турб}}$, $E_{12} = W_{\text{нас}}$, $E_{13} = W_{\text{ел}}$.

Потік ексергії 14 на виході з конденсатора визначається як

$$E_{14} = Q_{\text{конд}} \left[1 - \left(\frac{T_0 + 273,15}{T_5 + 273,15} \right) \right];$$

Ексергетичний ККД енергоустановки визначається за залежністю

$$\varepsilon_{\text{снст}} = \frac{E_{13}}{E_1}.$$

Тополого-ексергетична модель енергоустановки на суперкритичних параметрах

При побудові тополого-ексергетичної моделі використовується структурна теорія термoeкономіки, яка була розроблена представниками іспанської школи прикладної термодинаміки проф. А. Валеро і проф. М. Лозано [20]. Опис виробничої структури енергоблоку здійснюється за допомогою подання ексергетичних потоків за якісною ознакою паливо/продукт елемента енергоустановки з використанням LIFO-принципу декомпозиції потоків (останній виходить першим) [20]. Модель являє собою математичний опис роботи комплексу елементів енергоустановок, що взаємопов'язані потоками ексергії, з урахуванням процесу перетворення ексергії в кожному з них. За допомогою тополого-ексергетичної моделі встановлюється взаємозв'язок між ексергетичним ККД системи і ексергетичними ККД елементів.

Детальний алгоритм розробки тополого-ексергетичної моделі виробничої структури енергоустановки наведено авторами цієї роботи в монографії [11]. Тому в статті розглянемо лише загальні принципи її побудови.

Рівняння балансу ексергії для *k*-го елемента можна представити як

$$F_k - P_k - R_k = E_{Dk},$$

де F_k і P_k – відповідно «паливо» і «продукт» *k*-го елемента; R_k – потоки «залишки» (побічний продукт системи); E_{Dk} – деструкція ексергії в елементі.

Для потоку «палива» кожного елемента можна записати таке співвідношення:

$$F_k = E_{0k} + \sum_{i=1}^m E_{ik},$$

де E_{0k} – потоки ексергії, які входять в систему з зовнішніх джерел; E_{ik} , – потоки ексергії, що є «продуктами» інших елементів і входять в *k*-ий елемент у вигляді «палива».

При цьому потік з індексом *i* буде зі знаком «+», якщо він входить з *i*-го елемента в *k*-й, а зі знаком «-», якщо потік виходить з *k*-го елемента та входить в *i*-й елемент.

«Продукт» елемента запишемо як

$$P_k = E_{k0} + \sum_{k=1}^n E_{ki},$$

де E_{k0} – потоки ексергії, що є «продуктом» для навколишнього середовища; E_{ki} – потоки ексергії, що виходять з *k*-го елемента як «продукт» і входять до *i*-го елемента як «паливо».

Ексергетичний ККД елемента обчислюється наступним чином:

$$\varepsilon_k = P_k / F_k.$$

Для комп'ютерного моделювання структурних зв'язків схеми використовується матрична форма запису ексергетичних балансів. Структурні зв'язки представляються у вигляді орієнтованих графів $D = (V; L)$, які складаються з множини *V*, що відповідає елементам системи, та множини *L*, яка описує упорядковані пари вершин цієї системи.

Кожна функціонуюча частина енергоблоку, яка представлена на графі вершиною, розглядається як перетворювач ексергії і має уніфікований математичний опис. Величини потоків ексергії тут розглядаються як сигнали системи. По кожній дузі графа визначається ексергетична продуктивність окремої частини системи. Сформована таким чином топологічна модель дозволяє встановити залежність взаємозв'язку між зміною технологічної топології і кількісними характеристиками системи від вхідних змінних, які впливають на систему.

На рис. 2 представлено графічне відображення структурно-топологічної схеми ТЕЦ (див. рис. 1) у вигляді орієнтованого графа.

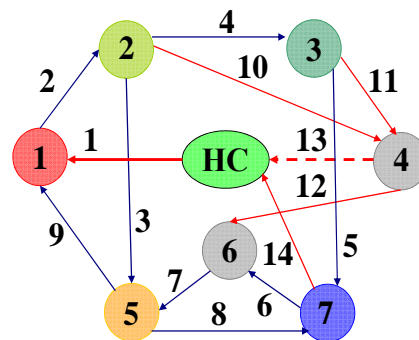


Рис. 2 – Орієнтований граф, що відображає роботу енергоустановки

Згідно з правилами структурної теорії термoeкономіки записується декомпозиція ексергетичних потоків на «паливо» та «продукт» (табл. 1) [10].

На основі матричної форми запису ексергетичного балансу визначаються вклади окремих потоків в ексергію «продуктів» системи та їх ексергетична вартість, знаходяться складові ексергетичних втрат в елементах енергоустановки, розраховуються ексергетичні ККД елементів.

У табл. 1 навколишнє середовище – це елемент, позначений номером «0».

Таблиця 1 – Декомпозиція ексергетичних вартісних потоків за ознакою «паливо»–«продукт» (рис. 2)

№ елемента	Паливо	Продукт
0	$E_{13} + E_{14}$	E_1
1	E_1	$E_2 - E_9$
2	$E_2 - E_3 - E_4$	E_{10}
3	$E_4 - E_5$	E_{11}
4	$E_{10} + E_{11}$	$E_{12} + E_{13}$
5	$E_3 - E_8$	$E_9 - E_7$
6	E_{12}	$E_7 - E_6$
7	$E_5 - E_6 + E_8$	E_{14}

Тополого-ексергетична модель виробничої структури теплової схеми ТЕЦ, що наведена вище, надалі є інструментом для пошуку оптимальних умов роботи енергоустановки.

Факторний аналіз теплової схеми ТЕЦ на основі тополого-ексергетичної моделі

При проведенні факторного аналізу, який спрямовано на визначення головних ефектів та ефектів взаємодії факторів, будемо використовувати теорію планування експерименту [21].

Для теплової схеми ТЕЦ потужністю 300 МВт, яку представлено на рис. 1, розглядалися дві задачі. По-перше досліджувався ефект впливу показників ефективності елементів енергоустановки на загальний ексергетичний ККД та окремі ККД елементів при заданому режимі роботи. Другим завданням було визначення впливу режимних параметрів роботи схеми при заданій ефективності обладнання.

При вирішенні першого завдання був побудований двоблоковий композиційний план, що включає 128 варіантів розрахунків при варіативності на різних рівнях 7 факторів. Як варійовані фактори були обрані: теплотехнічний ККД котла $\eta_{\text{котл}}$, адиабатний ККД частини турбіни ВТ $\eta_{\text{вт}}^{\text{турб}}$, адиабатний ККД частини турбіни НТ $\eta_{\text{нт}}^{\text{турб}}$, електричний ККД генератора $\eta_{\text{ген}}^{\text{ел}}$, ККД насоса $\eta_{\text{нас}}$, охолодження в проміжному теплообміннику TT_D , нагрів води в проміжному теплообміннику A_E . У табл. 2 вказано нижній і верхній рівні варіювання при проведенні 7-факторного експерименту.

При розрахунках задавалися наступні параметри пари на вході в турбіну ВТ: $P_1 = 254$ бар, $T_1 = 571$ °С; тиск пари на вході в турбіну НТ та на виході з неї: $P_{\text{пр}} = 60,55$ бар, $P_{\text{к}} = 0,0545$ бар.

Нижче наведені результати аналізу ексергетичної ефективності всієї схеми та окремих її елементів.

Регресійне рівняння зв'язку ексергетичного ККД системи $\epsilon_{\text{сист}}$ та ексергетичних ККД елементів ϵ_k має такий вигляд:

$$\epsilon_{\text{сист}} = (-1,0575 + 0,7542\epsilon_{\text{котл}} + 0,1878\epsilon_{\text{вт}}^{\text{турб}} + 0,242\epsilon_{\text{нт}}^{\text{турб}} + 0,3854\epsilon_{\text{ген}}^{\text{ел}} + 0,0665\epsilon_{\text{то}} + 0,0116\epsilon_{\text{нас}} + 0,2338\epsilon_{\text{конд}}).$$

Таблиця 2 – Діапазон варіювання при проведенні 7-факторного експерименту

Фактор	Нижній рівень	Верхній рівень
$\eta_{\text{котл}}$, %	75	89
$\eta_{\text{вт}}^{\text{турб}}$, %	85	95
$\eta_{\text{нт}}^{\text{турб}}$, %	85	95
$\eta_{\text{ген}}^{\text{ел}}$, %	92	97
$\eta_{\text{нас}}$, %	80	90
TT_D , К	10	20
A_E , К	5	10

Значення максимальної помилки складає 0,00273; середньостатистичне відхилення – 0,00111.

Ступінь впливу ексергетичних ККД елементів на ККД енергосистеми:

$$\epsilon_{\text{котл}} - 0,885, \epsilon_{\text{вт}}^{\text{турб}} - 0,116, \epsilon_{\text{нт}}^{\text{турб}} - 0,335, \epsilon_{\text{ген}} - 0,3099, \epsilon_{\text{то}} - (-0,02), \epsilon_{\text{нас}} - 0,04, \epsilon_{\text{конд}} - 0,084.$$

Аналіз отриманого рівняння регресії показав, що найбільшим впливовим елементом схеми щодо підвищення ефективності є котел, а найменшим – проміжний теплообмінник. Знак «-» вказує на зворотну залежність. Удосконалення ТО не доцільно, а навіть призведе до гірших наслідків для всієї схеми, оскільки втрати в ньому обумовлені впливом структурної незворотності всієї теплової схеми.

На рис. 3 показано основний ефект впливу факторів на ексергетичний ККД енергоустановки. Залежність $\epsilon_{\text{сист}}$ отримано при зміні від нижнього до верхнього почергово всіх розглянутих факторів, коли інші фактори мають середній рівень. Наприклад, $\eta_{\text{котл}}$ змінюється від 75 % до 89 %, а $\eta_{\text{вт}}^{\text{турб}} = 90$ %, $\eta_{\text{нт}}^{\text{турб}} = 90$ %, $\eta_{\text{ген}}^{\text{ел}} = 94,5$ % і так далі.

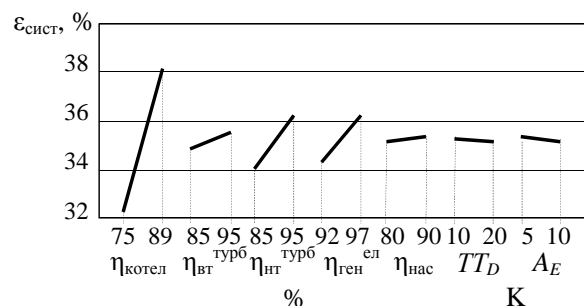


Рис. 3 – Основний ефект впливу факторів на ексергетичний ККД теплової схеми ТЕЦ

Розрахунки показали, що розглянута теплова схема ТЕЦ в цілому має низьку ексергетичну ефективність від 30 % (при нижньому рівні факторів) до 40,9 % (при верхньому рівні факторів), а ексергетичний ККД компресора змінюється від 42,6 % до 51 %. Тим часом, вона має певний прихований резерв для її підвищення. Про це можуть

свідчити високі значення ексергетичних ККД окремих її елементів, наприклад, конденсатора, які становлять 92 ÷ 96 % (рис. 4). Слід зазначити, що чим більше розбіжність між значеннями ексергетичного ККД системи і ексергетичними ККД її елементів, тим вище цей резерв при модернізації теплової схеми.

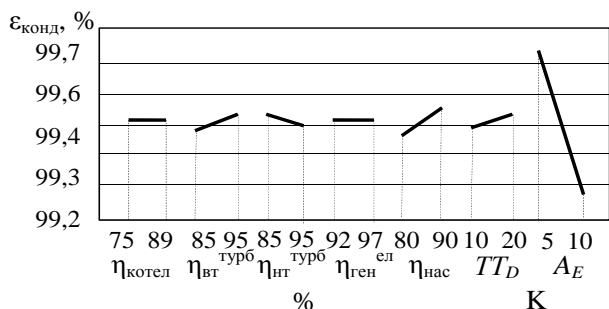


Рис. 4 – Вплив основних факторів на ексергетичний ККД конденсатора

Така ситуація обумовлена розвинутою внутрішньою регенерацією теплоти в схемі і наявністю циркуляційних потоків, які переносять ексергію, що перевищує ексергію на вході в систему.

Найбільший внесок в підвищення ефективності всієї схеми можна досягти вдосконаленням котла і частини турбіни низького тиску. Щодо котла, то такі заходи можуть мати деякі обмеження. За розрахунком максимально досяжний ексергетичний ККД котла в розглянутих умовах 50,6 %.

Можна відзначити фактично лінійний характер зміни ексергетичних ККД елементів від варійованих факторів без значного взаємовпливу на характеристики інших елементів. Це говорить про певну консервативність схеми, тобто вдосконалення розглянутого елемента позначиться тільки на самому елементі. Виняток становлять два елемента в схемі (конденсатор (див. рис. 4) і проміжний теплообмінник), при аналізі яких необхідно враховувати інтеграційні властивості системи.

На рис. 5 наведено залежність ексергетичного ККД проміжного теплообмінника в залежності від варійованих факторів.

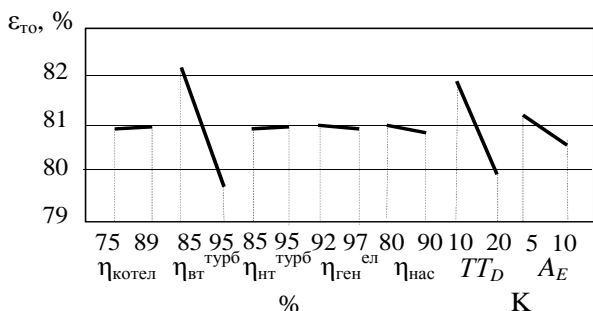


Рис. 5 – Ексергетичний ККД проміжного теплообмінника в залежності від варійованих факторів

При вирішенні другого завдання аналізу режимних параметрів був складений центральний композиційний план, який містить серію з 18 експериментів при варіативності 4 факторів. Як варійовані фактори були обрані: тиск пари на вході в турбіну високого тиску P_1 , температура пари на вході в турбіну високого тиску T_1 , проміжний тиск $P_{пр}$, тиск конденсації пари $P_к$. У табл. 3 вказано нижній та верхній рівні варіювання. Фіксованими приймалися такі показники роботи обладнання: ККД котла – 89 %, адіабатний ККД частини турбіни ВТ – 95 %, адіабатний ККД частини турбіни НТ – 95 %, ККД генератора – 97 %, ККД насоса – 90 %, $TT_D = 20$ К, $A_E = 10$ К.

Таблиця 3 – Діапазон варіювання факторів при аналізі режимних параметрів

Фактор	Нижній рівень	Верхній рівень
P_1 , бар	254	300
T_1 , °C	571	596
$P_{пр}$, бар	60,55	70,3
$P_к$, бар	0,0545	0,065

На рис. 6–9 показано залежності ексергетичного ККД системи та ексергетичних ККД елементів від зміни режимних параметрів.

Як можна бачити з рис. 6–9 неоднозначним фактором щодо впливу на ексергетичну ефективність всієї теплової схеми з надкритичними параметрами водяної пари і окремих її елементів є вибір тиску пари на вході в частину турбіни ВТ.

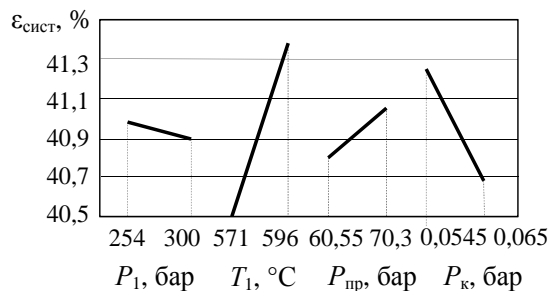


Рис. 6 – Ексергетичний ККД системи в залежності від зміни режимних параметрів

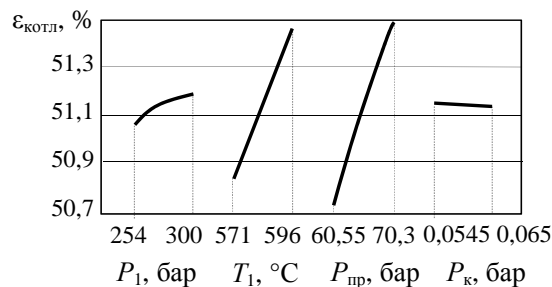


Рис. 7 – Ексергетичний ККД котла в залежності від режимних параметрів

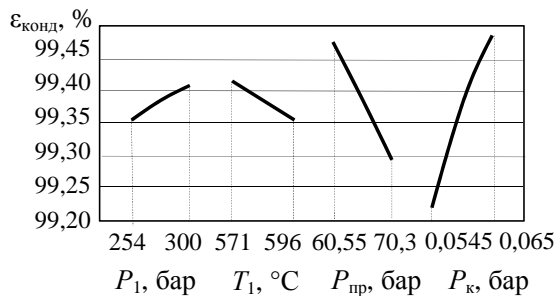


Рис. 8 – Ексергетичний ККД конденсатора в залежності від режимних параметрів

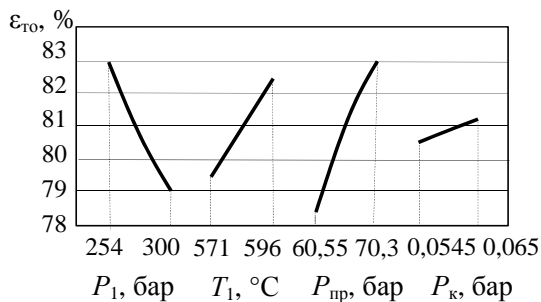


Рис. 9 – Ексергетичний ККД ТО в залежності від режимних параметрів

Для підвищення ефективності системи тиск пари P_1 доцільно підтримувати на нижньому рівні обраного інтервалу варіювання. Це пов'язано з тим, що з ростом P_1 збільшується вологість пари після турбіни низького тиску до 20 %. Проте підвищення T_1 призводить до збільшення загальної ефективності схеми при зниженні вологості пари. Цей результат показує, що для роботи ТЕЦ на суперкритичних параметрах пари при подальшому підвищенні тиску слід обирати схеми з проміжним перегрівом пари. Це питання буде доопрацьовано в дослідженнях на наступному етапі з урахуванням обраних схем модернізації енергоблоків ТЕЦ.

Висновки

У рамках розробленого підходу до проведення ексергетичного факторного аналізу теплових схем ТЕЦ з суперкритичними параметрами пара вирішено наступні завдання.

1. Створено термодинамічну і топологічно-ексергетичну модель теплової схеми ТЕЦ, що дозволило провести розрахунок статичних характеристик енергоустановки, визначити значення ексергії потоків і ексергетичної ефективності кожного елемента і системи в цілому.

2. Запропоновано застосовувати теорію планування експерименту в ексергетичному аналізі теплової схеми ТЕЦ, що працює за суперкритичними параметрами пари. На основі цієї теорії отримано регресійні рівняння функціонального зв'язку ексергетичного ККД системи і ексергетичних ККД елементів. Запропоноване рівняння може бути використане в якості інструментарію для подальшого

навчання нейронних мереж при створенні відповідного програмного забезпечення для розрахунку теплової схеми. Встановлено головні ефекти впливу варійованих параметрів і ефекти їх взаємодії на ексергетичну ефективність.

3. За результатами факторного аналізу виявлено досить висока консервативність розглянутої одноступеневої схеми ТЕЦ до зміни варійованих параметрів. Це свідчить про наявність досить жорстких структурних зв'язків між елементами, що в цілому є позитивним аспектом при реконструкції енергоустановки.

Список літератури

1. Kumar R. A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4-E) analysis of thermal power plants. *Engineering Science and Technology, an International J.* 2017. Vol. 20. P. 283–292. doi:10.1016/j.jestch.2016.08.018.
2. Restrepo A., Miyake R., Kleveston F., Bazzo E. Exergetic and environmental analysis of a pulverized coal power plant. *Energy.* 2012. Vol. 45 (1). P. 195–202. doi:10.1016/j.energy.2012.01.080.
3. Li Y. Thermodynamic analysis and optimization of a double reheat system in an ultra-supercritical power plant. *Energy.* 2014. Vol. 74. P. 202–214. doi:10.1016/j.energy.2014.05.057.
4. Cui J., Chai T., Liu X. Deep-neural-network-based economic model predictive control for ultra-supercritical power plant. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2020. Vol. 16. P. 5905–5913. doi:10.1109/tii.2020.2973721.
5. Adibhatla S., Kaushik S.C. Energy and exergy analysis of a super critical thermal power plant at various load conditions under constant and pure sliding pressure operation. *Appl. Therm. Eng.* 2014. Vol. 73 (1). P. 49–63. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.07.030
6. Ahmadi Gh. R., Toghraie D. Energy and exergy analysis of montazeri steam power plant in Iran. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2016. Vol. 56. P. 454–463. doi:10.1016/j.rser.2015.11.074
7. Ahmadi P., Dincer I. Thermodynamic analysis and thermoeconomic optimization of a dual pressure combined cycle power plant with a supplementary firing unit. *Energy Convers. Manage.* 2011. Vol. 52 (5). P. 2296–2308. doi:10.1016/j.enconman.2010.12.023.
8. Liu X. J., Kong X. B., Hou G. L., Wang J.H. Modeling of a 1000 MW power plant ultra super-critical boiler system using fuzzy-neural network methods. *Energy Convers. Manag.* 2013. Vol. 53. P. 518–527. doi:10.1016/j.enconman.2012.07.028
9. Zhang, L.; Kong, X.; Lee, K.Y. Stacked auto-encoder modeling of an ultra-supercritical boiler-turbine system. *Energies.* 2019. Vol. 12 (21). 4035. doi:10.3390/en12214035.
10. Bejan A., Tsatsaronis G. Purpose in Thermodynamics. *Energies.* 2021. Vol. 14. 408. doi:10.3390/en14020408.
11. Kharlampidi D., Tarasova V., Kuznetsov M., Voytenko E. Thermodynamic analysis of air-compression refrigerating machine based on the exergy cost theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2017. Vol. 5. № 8 (89). P. 30–38. doi:10.15587/1729-4061.2017.112113
12. Lukowicz H., Dykas S., Rulik S., Stepczynska K. Thermodynamic and economic analysis of a 900 MW ultra-

- supercritical power unit. *Archives of thermodynamics*. 2011. Vol. 32. № 3. P. 231–244. doi:10.2478/v10173-011-0025-1.
13. Peyyala N. R., Govindarajulu Dr. K. Technology thermodynamic analysis of 1200 MW coal based supercritical thermal power plant with single and double reheating. *Int. J. of Engineering Sciences & Research Technology*. 2017. Vol. 3. P. 677–684.
 14. Hastia S., Aroonwilasa A., Veawaba A. Exergy Analysis of Ultra Super-Critical Power Plant. *Energy Procedia*. 2013. Vol. 37. P. 2544–2551. doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.137.
 15. Torres C., Valero A., Serra L., Royo J. Structural theory and thermoeconomic diagnosis. Part 1. On malfunction and dysfunction analysis. *Energy Conversion and Management*. 2002. Vol. 43. № 9. P. 1503–1518. doi:10.1016/S0196-8904(02)00032-8.
 16. Sun L., Li D., Lee K. Y., Xue Y. Control-oriented modeling and analysis of direct energy balance in coal-fired boiler-turbine unit. *Control Eng. Pract.* 2016. Vol. 55. P. 38–55. doi: 10.1016/j.conengprac.2016.06.013.
 17. Ноздренко Г. Н., Шинников П. А. *Комплексный эксергетический анализ энергоблоков ТЭЦ с новыми технологиями: монография*. Новосибирск: Изд. НГТУ, 2009. 190 с.
 18. Мацевитый Ю. М., Харлампида Д. Х., Тарасова В. А., Кузнецов М. А. *Термоэкономическая диагностика и оптимизация пароконденсаторных термотрансформаторів: монография*. Харьков: ЧП «Технологический Центр». 2016. 160.
 19. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалек К. *Эксергетический метод и его приложения: монография*. Москва: Энергоатомиздат. 1988. 88 с.
 20. Pina E.A., Lozano M.A., Serra L.M. Thermoeconomic cost allocation in simple trigeneration systems including thermal energy storage. *Energy*. 2018. Vol. 153. P. 170–184. doi: 10.1016/j.energy.2018.04.012.
 21. Theodore A. *Introduction to Engineering Statistics and Lean Sigma: Statistical Quality Control and Design of Experiments and Systems*. Springer, 2018. 656 p.
- References (transliterated)**
1. Kumar R. A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4-E) analysis of thermal power plants. *Engineering Science and Technology, an International J.*, 2017, Vol. 20, pp. 283–292, doi: 10.1016/j.jestch.2016.08.018.
 2. Restrepo A., Miyake R., Kleveston F., Bazzo E. Exergetic and environmental analysis of a pulverized coal power plant. *Energy*, 2012, Vol. 45(1), pp. 195–202, doi: 10.1016/j.energy.2012.01.080.
 3. Li Y. Thermodynamic analysis and optimization of a double reheat system in an ultra-supercritical power plant. *Energy*, 2014, Vol. 74, pp. 202–214, doi: 10.1016/j.energy.2014.05.057.
 4. Cui J., Chai T., Liu X. Deep-neural-network-based economic model predictive control for ultra-supercritical power plant. *IEEE Trans. Ind. Inform.*, 2020, Vol. 16, pp. 5905–5913, doi: 10.1109/tii.2020.2973721.
 5. Adibhatla S., Kaushik S.C. Energy and exergy analysis of a super critical thermal power plant at various load conditions under constant and pure sliding pressure operation. *Appl. Therm. Eng.*, 2014, Vol. 73 (1), pp. 49–63, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.07.030.
 6. Ahmadi Gh. R., Toghraie D. Energy and exergy analysis of montazeri steam power plant in Iran. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2016, Vol. 56, pp. 454–463, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.074.
 7. Ahmadi P., Dincer I. Thermodynamic analysis and thermoeconomic optimization of a dual pressure combined cycle power plant with a supplementary firing unit. *Energy Convers. Manage.*, 2011, Vol. 52(5), pp. 2296–2308, doi: 10.1016/j.enconman.2010.12.023.
 8. Liu X. J., Kong X. B., Hou G. L., Wang J. H. Modeling of a 1000 MW power plant ultra super-critical boiler system using fuzzy-neural network methods. *Energy Convers. Manag.*, 2013, Vol. 53, pp. 518–527, doi: 10.1016/j.enconman.2012.07.028.
 9. Zhang L., Kong X., Lee K.Y. Stacked auto-encoder modeling of an ultra-supercritical boiler-turbine system. *Energies*, 2019, Vol. 12 (21), 4035, doi: 10.3390/en12214035.
 10. Bejan A., Tsatsaronis G. Purpose in Thermodynamics. 2021, *Energies*, 2021, Vol. 14, p. 408, doi: 10.3390/en14020408.
 11. Kharlampidi D., Tarasova V., Kuznetsov M., Voytenko E. Thermodynamic analysis of air-compression refrigerating machine based on the exergy cost theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, Vol. 5. №8 (89), pp. 30–38, doi: 10.15587/1729-4061.2017.112113.
 12. Lukowicz H., Dykas S., Rulik S., Stepczynska K. Thermodynamic and economic analysis of a 900 MW ultra-supercritical power unit. *Archives of thermodynamics*, 2011, Vol. 32, № 3, pp. 231–244, doi: 10.2478/v10173-011-0025-1.
 13. Peyyala N. R., Govindarajulu Dr. K. Technology thermodynamic analysis of 1200 MW coal based supercritical thermal power plant with single and double reheating. *Int. J. of Engineering Sciences & Research Technology*, 2017, Vol. 3, pp. 677–684.
 14. Hastia S., Aroonwilasa A., Veawaba A. Exergy Analysis of Ultra Super-Critical Power Plant. *Energy Procedia*, 2013, Vol. 37, pp. 2544–2551, doi:10.1016/j.egypro.2013.06.137.
 15. Torres C., Valero A., Serra L., Royo J. Structural theory and thermoeconomic diagnosis. Part 1. On malfunction and dysfunction analysis. *Energy Conversion and Management*, 2002, Vol. 43, no. 9, pp. 1503–1518, doi: 10.1016/S0196-8904(02)00032-8.
 16. Sun L., Li D., Lee K.Y., Xue Y. Control-oriented modeling and analysis of direct energy balance in coal-fired boiler-turbine unit. *Control Eng. Pract.*, 2016, Vol. 55, pp. 38–55, doi: 10.1016/j.conengprac.2016.06.013.
 17. Nozdrenoko G. N., Shinnikov P. A. *Kompleksnyy eksergeticheskiy analiz energoblokov TETS s novymi tekhnologiyami* [Complex exergy analysis of CHP power units with new technologies]. Novosibirsk, 2009, 190 p.
 18. Matsevity Yu. M., Kharlampidi D. Kh., Tarasova V.A., Kuznetsov M.A. *Termoekonomicheskaya diagnostika i optimizatsiya parokomprensornykh termotransformatoriv* [Thermoeconomic diagnostics and optimization of steam compressor thermal transformers]. Kharkov, 2016, 160 p.
 19. Brodyansky V. M., Fratscher V., Mikhalek K. *Eksergeticheskiy metod i yego prilozheniya*. Moskva, *Energoatomizdat* [Exergetic method and its applications]. Moscow, 1988, 88 p.
 20. Pina E.A., Lozano M.A., Serra L.M. Thermoeconomic cost allocation in simple trigeneration systems including thermal energy storage. *Energy*, 2018, Vol. 153, pp. 170–184, doi: 10.1016/j.energy.2018.04.012.
 21. Theodore A. *Introduction to Engineering Statistics and Lean Sigma: Statistical Quality Control and Design of Experiments and Systems*: 3rd Edition. Springer, 2018, 656 p.

Відомості про авторів (About authors)

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

Victoria Tarasova – Doctor of Technical Sciences, A. M. Podgorny Institute Problem in Machinery of NAS of Ukraine, Senior Researcher of Department of Modeling and Identification of Thermal Processes, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3252-7619; e-mail: vat523710@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Тарасова В. О. Факторний аналіз теплової схеми ТЕЦ з суперкритичним паровим циклом на основі ексергетичного методу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 46-55. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.07.

Please cite this article as:

Tarasova V. Factor analysis of the thermal scheme of CHP with super critical steam cycle on the basis of exergy method. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 46-55, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.07.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Тарасова В. А. Анализ тепловой схемы ТЭЦ с суперкритическим паровым циклом на основе эксергетического метода. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серія: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 46-55. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.07.

АННОТАЦИЯ Наиболее перспективным направлением модернизации ТЭЦ является внедрение энергоблоков на суперкритических параметрах пара (СКП). Повышение параметров пара – это один из наиболее эффективных способов увеличения КПД ТЭЦ. Таким образом, разработка концепции создания тепловых схем турбоустановок на СКП с учетом особенностей их эксплуатации на действующих ТЭЦ Украины является актуальной научной проблемой, решение которой позволит выполнить замену или модернизацию отработавшего свой ресурс энергогенерирующего оборудования на современные энергоблоки, соответствующие мировым стандартам по экономичности и экологичности. В статье адаптирован метод эксергетического анализа к исследованию тепловых схем ТЭЦ с суперкритическим паровым циклом. В качестве примера применения метода проведен эксергетический анализ энергоустановки, работающей по одноступенчатой тепловой схеме. В рамках предложенного метода создано термодинамическую, а также тополого-эксергетическую модель энергоустановки. На основе тополого-эксергетической модели определены показатели термодинамической эффективности энергоустановки, работающей на суперкритических параметрах пара. Предложено применять теорию планирования эксперимента при эксергетическом анализе тепловой схемы ТЭЦ. С привлечением этой теории проведено многофакторный численный эксперимент по определению влияния на эксергетическую эффективность тепловой схемы ТЭЦ основных определяющих варьируемых факторов, таких как адиабатные и теплотехнические КПД элементов установки, а также режимные параметры ее работы. Получено обобщенное уравнение функциональной взаимосвязи эксергетического КПД системы и эксергетических КПД элементов тепловой схемы ТЭЦ. Полученное уравнение может быть использовано в качестве инструментария для дальнейшего обучения нейронных сетей и применения, как при проектировании, так и при диагностике энергетической эффективности работы ТЭЦ. По результатам факторного анализа выявлено достаточно высокую консервативность рассматриваемой одноступенчатой схемы ТЭЦ к изменению варьируемых параметров. Это свидетельствует о наличии достаточно жестких структурных связей между элементами схемы, что в целом является положительным аспектом при ее реконструкции.

Ключевые слова: эксергетический метод; суперкритический паровой цикл; суперкритические параметры пара; факторный анализ; потоковые графы; тополого-эксергетическая модель; ТЭЦ

Надійшла (received) 26.04.2021

УДК 510.635:004.891(045)

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.08

РОЛЬ ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ ДЛЯ КОМАНДНОЇ РОЗРОБКИ

А. І. ВАВІЛЕНКОВА

кафедра комп'ютеризованих систем управління ФККПІ, Національний авіаційний університет, Київ, УКРАЇНА
e-mail: vavilenkova@gmail.com

АНОТАЦІЯ Досліджено особливості процесів тестування програмного продукту під час роботи у Scrum-команді. Виокремлено види тестування, характерні для методики гнучкого тестування, що дають змогу зробити процес тестування постійно інтегрованим у командну роботу, як на етапі формування вимог та проєктування, так і на етапі кодування та генерації тестових наборів. Це стає можливим при внесенні рекомендацій тестера у процес формування користувацьких історій, плануванні виходу версії програмного продукту з точки зору тестування та дефектів, плануванні спринту на основі користувацьких історій та дефектів, виконанні спринту з неперервним тестуванням, регресійному тестуванні після завершення спринту та формуванні звітів про результати тестування. Виділено етапи процесу гнучкого тестування у Scrum-команді. Запропоновано автоматизувати процес гнучкого тестування для навчального командного проєкту у програмному середовищі Visual Studio на базі Team Foundation Server. Продемонстровано приклад автоматизації процесу гнучкого тестування шляхом його розбиття на чотири квадранти для дотримання принципів роботи за гнучкою методологією розробки програмного забезпечення. У першому квадранті відбувається дослідження якості внутрішнього коду програмного продукту, тобто проведення модульного тестування. Для реалізації модульного тестування в Visual Studio створюється нове рішення з метою генерування класу для тестування, у тілі якого прописуються умови для тестування. Другий квадрант реалізує принципи системного тестування, тому на цьому етапі продемонстровано особливості створення такого тестового артефакту, як тестові випадки, що передбачає виконання певних умов для перевірки функціональності програмного продукту, який розробляється; встановлення зв'язку між створеними тестовими випадками та користувацькими історіями, представленими у вигляді задач командного проєкту Product Backlog. Наведено приклад ручного тестування за допомогою спеціального інструменту Microsoft Test Manager, який дозволяє створювати плани, додавати та оновлювати тестові випадки, виконувати ручні тести. У третьому квадранті здійснено дослідне тестування у Microsoft Test Manager та створено ще один тестовий артефакт – звіти про помилки. У четвертому квадранті здійснюється автоматичне тестування нефункціональних вимог до програмного забезпечення.

Ключові слова: гнучке тестування; гнучка методологія; Scrum-команда; командний проєкт; Product Backlog; тестовий випадок; програмне забезпечення

THE ROLE OF SOFTWARE TESTING FOR TEAM DEVELOPMENT

A. VAVILENKOVA

Department of Computerized Control Systems, National Aviation University, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The peculiarities of software product testing processes while working in the Scrum-team were studied. The types of testing characteristic of the flexible testing technique are singled out, that make it possible to make the testing process constantly integrated into teamwork, both at the stage of requirements formation and design, and at the stage of coding and generation of test sets. This is possible by making the tester's recommendations in the process of creating user stories, planning the release of the software version in terms of testing and defects, planning a sprint based on user stories and defects, performing a sprint with continuous testing, regression testing after sprint ends and reporting of results of testing. The article highlights the stages of the flexible testing process in the Scrum team. It is proposed to automate the process of flexible testing for a training team project in the Visual Studio software environment based on Team Foundation Server. Author demonstrates an example of automation of the process of flexible testing by dividing it into four quadrants to comply with the principles of working on a flexible methodology of software development. In the first quadrant there is a study of the quality of the internal code of the software product, the modular testing. To implement modular testing in Visual Studio, a new solution is created in order to generate a class for testing, where the conditions for testing are prescribed in the body of the class. The second quadrant implements the principles of system testing. At this stage the features of creating such a test artifact as test cases are demonstrated. That provides for the fulfillment of certain conditions to verify the functionality of the developing software product; linking between created test cases to user stories presented as team project tasks Product Backlog. The study demonstrates an example of manual testing using a special tool Microsoft Test Manager, which allows you to create plans, add and update test cases, perform manual tests. In the third quadrant, it was performed a trial test in Microsoft Test Manager and it was created another test artifact - error reports. The fourth quadrant automatically tests non-functional software requirements.

Keywords: flexible testing; flexible methodology; Scrum-team; team project; Product Backlog; test case; software

Вступ

Результатом командної роботи під час розробки програмного забезпечення є вчасно

виготовлений, якісний програмний продукт. Часто у цьому процесі недооцінюють роль тестування, як важливого процесу перевірки відповідності поставлених до продукту вимог та реально

реалізованої функціональності, що спостерігається у штучно створених ситуаціях на обмеженому наборі тестів [1].

Згідно з практикою гнучкого тестування, що притаманна гнучким методологіям розробки програмного забезпечення, розпочинається тестування на початку проекту з постійної інтеграції між розробкою та перевіркою проміжних результатів командної роботи [2]. Таким чином, гнучке тестування неперервне, на відміну від тестування за каскадною моделлю, де воно виконується лише після етапу кодування.

Тестування проходить через увесь життєвий цикл розробки програмного забезпечення, а тестери поряд з іншими членами Scrum-команди, вносять свій внесок на етапах формування вимог, проєктування, кодування та генерації тестових наборів [3].

Існує досить багато видів тестування, кожен з яких доцільно використовувати на тому чи іншому етапі розробки програмного забезпечення залежно від поставлених на даному спринті задач (рис. 1).



Рис. 1 – Види тестування при розробці програмного забезпечення

Своєчасне застосування конкретного виду тестування забезпечує реалізацію основної функції тестування – техніки контролю якості, здійснюючи аналіз та планування, розробку тестових сценаріїв, оцінку критеріїв закінчення тестування, написання звітів, рецензування документації та проведення статистичного аналізу [4,5]. Тому проблема автоматизації процесів тестування та вибору програмного забезпечення для цього є, безумовно, актуальною.

Мета роботи

Фактично баг або дефект існує при одночасному виконанні трьох умов: коли відомий очікуваний результат; коли відомий фактичний результат; коли фактичний результат відрізняється від очікуваного [6]. При цьому джерелами дефектів

можуть бути помилки в специфікації, дизайні або реалізації програмного продукту, помилки використання програмного забезпечення, зумисне нанесення шкоди, умови зовнішнього середовища та потенційні наслідки попередніх помилок.

Для своєчасної фіксації та усунення дефектів при розробці програмного забезпечення членам команди потрібно мати постійний доступ до інформації та здійснювати постійну комунікацію щодо результатів роботи тестера. Це стає можливим завдяки автоматизації процесів тестування та використанню спеціальних програмних засобів, які дозволяють автоматично компілювати та перевіряти додатки, формувати звіти про помилки та здійснювати аналіз результатів тестування.

Тому метою даної статті є дослідження особливостей процесів тестування програмного продукту під час роботи у Scrum-команді.

Виклад основного матеріалу

Згідно з методикою гнучкого тестування, яку використовує командний проєкт, що функціонує на основі методології Scrum [7], тестування повинне включати в себе [8]:

- внесення рекомендацій тестера у процес формування користувацьких історій, що базується на очікуваній поведінці системи, тобто створення тестових випадків;
- планування виходу версії програмного продукту з точки зору тестування та дефектів;
- планування спринту на основі користувацьких історій та дефектів;
- виконання спринту з неперервним тестуванням;
- регресійне тестування після завершення спринту;
- формування звітів про результати тестування.

Усі ці етапи вдало поєднуються завдяки створенню та реалізації тестових артефактів: специфікації вимог, тест-плану, тестових випадків та звітів про помилки [9]. Автоматизувати процес гнучкого тестування у навчальному командному проєкті можна у програмному середовищі Visual Studio на базі Team Foundation Server або інших його версій.

Особливістю гнучкого тестування є поділ всього процесу тестування на чотири квадранти, що допомагає Scrum-команді спланувати процес тестування [10].

Квадрант Q1 – передбачає дослідження якості внутрішнього коду програмного продукту, базується на створенні та проведенні модульного тестування. Модульні тести зберігаються в системі контролю версій та виконуються при кожній побудові додатку. Модульні тести є основою регресійного тестування, яке виконується при додаванні нових можливостей або модифікацій програмного забезпечення [11,12].

Для реалізації модульного тестування в Visual Studio створюється нове рішення (модульний тест) на основі шаблону «Native Unit Tests Project» з метою генерування класу для тестування (рис. 2), у тілі якого прописуються умови для тестування.

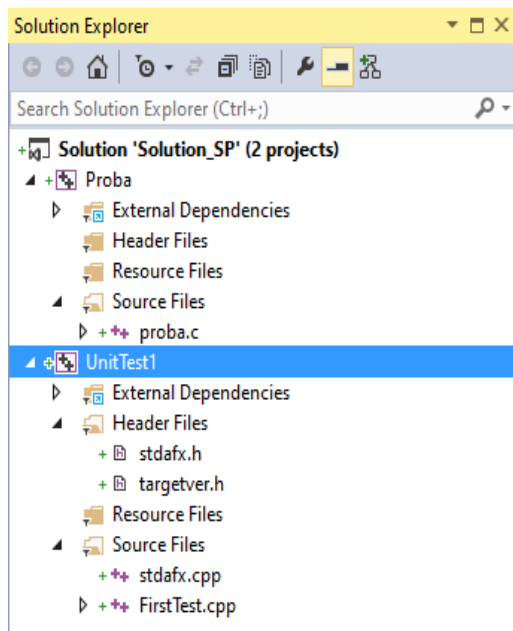


Рис. 2 – Створення модульного тесту в Visual Studio

Квадрант Q2 – реалізує принципи системного тестування, містить тестові випадки – один із артефактів тестування, орієнтований на вимоги користувача. Це передбачає створення тестових випадків, тобто певних умов для перевірки функціональності програмного продукту.

Робочий елемент «Test Case» у Visual Studio призначений для опису умов тестування вимог користувача. Наприклад, у командному проекті створювався тестовий випадок для тестування коректності розрахунку мінімальної вартості, для якого на вкладці «Steps» вводилася послідовність дій, які необхідно зробити при тестуванні, та очікуваний результат у відповідь на вказану дію (рис. 3).

Кожен тестовий випадок підв'язується під певну задачу, що запланована та вирішується на конкретному спринті.

Для безпосереднього проведення тестування у програмному середовищі Visual Studio на основі Team Foundation Server використовується спеціальний інструмент тестування Microsoft Test Manager, який дозволяє створювати плани, додавати та оновлювати тестові випадки, виконувати ручні та автоматичні тести [13].

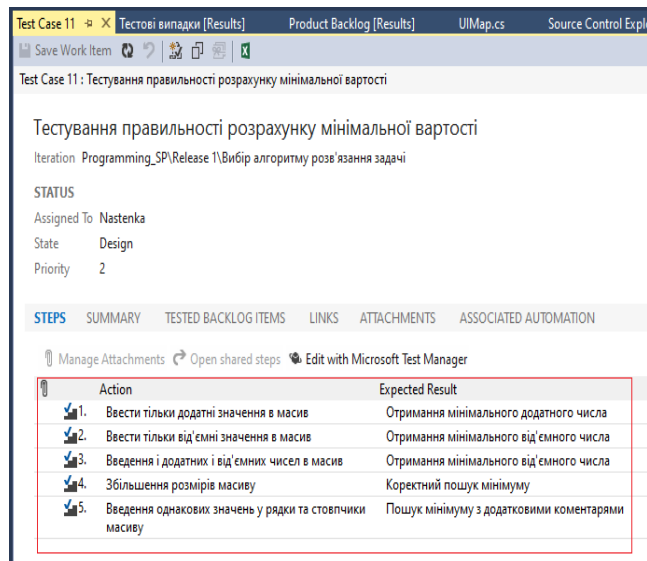


Рис.3 – Приклад створення тестового випадку в Visual Studio

На етапі здійснення системного тестування проводилося ручне тестування. Для цього на сторінці «Test» в Microsoft Test Manager обрався та запускався в роботу тестовий випадок. Після цього тестер виконує запропоновані кроки тестового випадку, цим самим виконуючи заплановані у тестовому плані дії, та співвідносить фактичний результат з очікуваним (рис. 4).

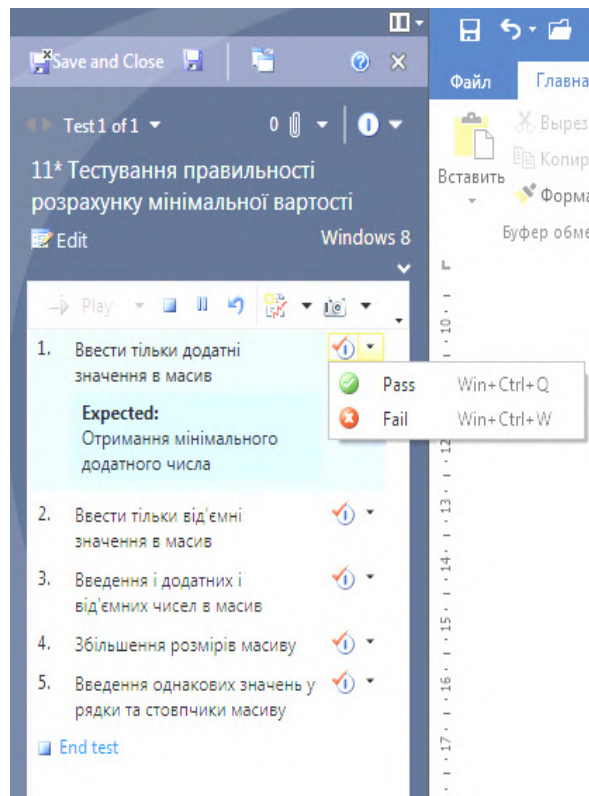


Рис. 4 – Приклад проведення ручного тестування у Microsoft Test Manager

Саме тому хід думок спеціаліста, що здійснює тестування, повинен відрізнятись від мислення розробника, а тестер повинен бути незалежним, володіти необхідними знаннями у предметній області та програмуванні, за рахунок чого може більше ефективно виявити дефекти в системі, ніж програміст. У тестуванні виділяють чотири рівні незалежності тестування:

- тести для програми розробляються та проводяться автором програми;
- тести розробляються та реалізуються людьми, не причетними до написання коду та розробки алгоритму;
- тести розробляються представниками інших організацій або спеціалізованими тестерами для проведення тестування тестерами команди розробника;
- тести розробляються та виконуються спеціалістами з інших організацій.

Тестер виконує дії кожного кроку та встановлює індикатор відповідно до того, чи досягнуто очікуваний результат (рис. 5).

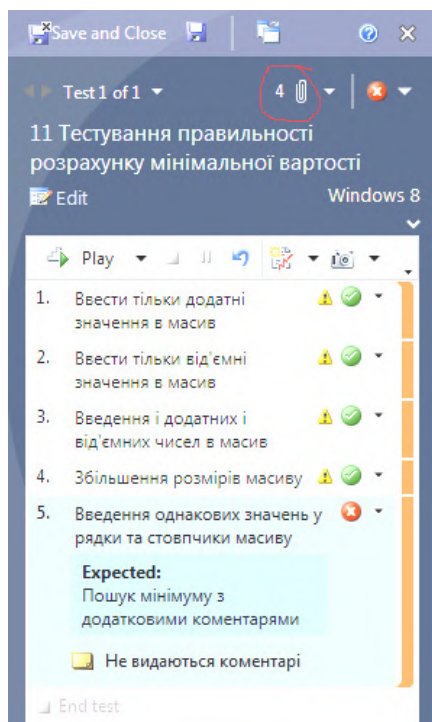


Рис. 5 – Результат проведення ручного тестування у Microsoft Test Manager

Квадрант Q3 – забезпечує зворотний зв'язок, а тестові випадки використовуються як основа для автоматичного тестування. У цьому квадранті проводиться багато циклів ітераційних перевірок шляхом здійснення дослідного тестування, тестування юзабіліті, приймального тестування.

Для дослідного тестування в інструменті Microsoft Test Manager передбачено можливість одночасного тестування (рис. 6) та створення ще

одного важливого тестового артефакту - детального звіту про помилку (рис. 7).

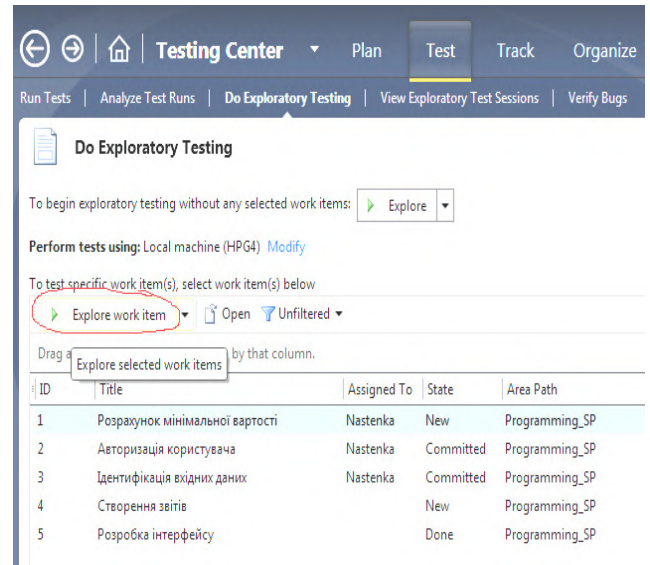


Рис. 6 – Приклад проведення дослідного тестування у Microsoft Test Manager

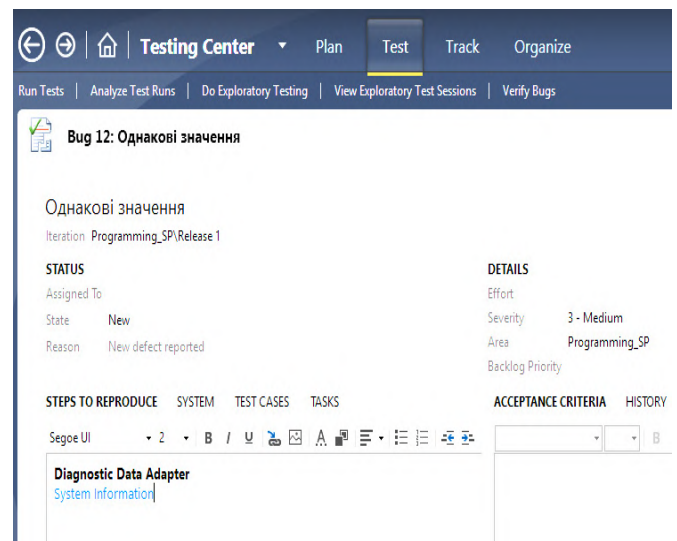


Рис. 7 – Приклад створення звіту про помилку

Квадрант Q4 – концентрує увагу на нефункціональних вимогах, таких як продуктивність, безпека, стабільність, для чого використовують спеціальні інструменти, а також тестування автоматизації.

У Visual Studio можна створювати декілька видів автоматичних тестів (закодовані тести користувача, модульні тести та тести для веб-форм), тип яких визначається конкретною метою задачі. Тому створене рішення для автоматичного тестування обов'язково під'язується під задачу Product Backlog (рис. 8).

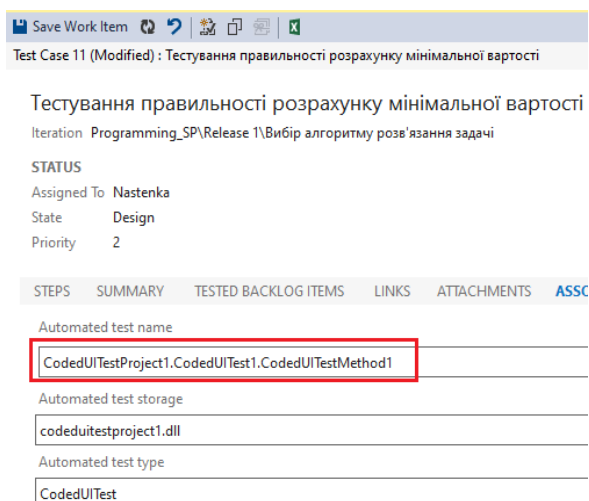


Рис. 8 – Приклад застосування автоматичного тесту

Після закінчення генерації проекту автоматичного тестування він додається у рішення всього командного проекту і стає доступним для всіх членів Scrum-команди.

Наведені приклади реалізації механізмів тестування у програмному середовищі Visual Studio на базі Team Foundation Server з використанням інструменту Microsoft Test Manager дають змогу простежити весь процес тестування створеного програмного продукту під час командної розробки згідно з гнучкою методологією Scrum.

Висновки

Тестування програмного забезпечення є складним, інтегрованим в усі етапи розробки процесом. Саме тому згідно принципів гнучкої методології Scrum потрібно дотримуватися основних вимог до тестування, зокрема, орієнтуватися на створення та роботу з тестовими артефактами [14]. Так, перший із них – це специфікація вимог – закінчений опис поведінки програми, яку потрібно розробити. Тест-план – документ, що описує весь обсяг робіт з тестування, починаючи з опису об'єктів тестування, стратегій, розкладу, критеріїв початку та закінчення, до необхідного в процесі тестування обладнання, спеціальних знань, а також оцінки ризиків. Тестові випадки, на створення яких та роботу з якими спрямовано матеріал даної статті, є набором дій або умов, необхідних для перевірки функціональності програмного продукту. Ще один важливий тестовий артефакт – це звіт про помилку, тобто технічний документ, який містить повний опис бага, включаючи інформацію про саму помилку та умови її виникнення. Таким чином, здійснення тестування на всіх етапах розробки програмного забезпечення при командній розробці – це запорука своєчасного створення якісного програмного продукту.

Список літератури

1. Брауде Э. *Технология разработки программного обеспечения*. СПб.: Питер, 2004. 655 с.
2. Nidagundi P., Novickis L. Introducing Lean Canvas Model Adaptation in the Scrum Software Testing. *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 104. P. 97-103. doi: 10.1016/j.procs.2017.01.078.
3. Satherland D. Scrum. *The Art of Doing Twice the Work in Half the Time*. Random House, 2015. 256 p.
4. Tahera K., Wynn D. C., Earl C. et al. Testing in the incremental design and development of complex products. *Res Eng Design*. 2019. Vol. 30. P. 291–316. doi: 10.1007/s00163-018-0295-6.
5. Вавіленкова А. І., Литвиненко О. Є., Жолдаков О. О. *Управління проектами інформатизації*: навч. посіб. К.: НАУ, 2015. 220 с.
6. Kaner C., Falk J., Nguyen H.Q. *Testing Computer Software Second Edition*. Dreamtech Press, 2000. 478 p.
7. Вавіленкова А. І. Аналіз гнучких методологій розробки програмного забезпечення для реалізації у командних проектах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 39-46. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.06.
8. Black R. *Pragmatic Software Testing Becoming an Effective and Efficient Test Professional*. John Wiley & Sons, 2011. 366p.
9. Gokceoglu M., Sozer H. Automated defect prioritization based on defects resolved at various project periods. *Journal of Systems and Software*. 110993. 2021. doi: 10.1016/j.jss.2021.110993.
10. Shvaber K. Scrum. *Flexible product management and business*. Alpina Publisher Ukraine, 2019. 236 p.
11. Mitchell J., Black R. *Advanced Software Testing - Vol. 3, 2nd Edition: Guide to the ISTQB Advanced Certification as an Advanced Technical*. Test Analyst Rocky Nook, Inc., 2015. 480 p.
12. Giotis T. C. How to deliver successful IT projects using MSF team model and MSF process model. Paper presented at PMI® Global Congress 2007— EMEA, Budapest, Hungary. Newtown Square, PA: Project Management Institute. URL: <https://www.pmi.org/learning/library/deliver-project-microsoft-solutions-framework-7413> (дата звернення: 28.04.2021).
13. Резник С., Бьорк А., де ла Маза М. *Scrum с Team Foundation Server 2010. Профессиональный подход*, 2012. 416 с.
14. Breno G. Tavares, E, Carlos da Silva, Adler D. de Souza Risk Management in Scrum Projects: A Bibliometric Study. *Journal of Communications Software*. 2017. Vol. 13. No. 1. doi: 10.24138/jcomss.v13i1.241.

References (transliterated)

1. Braude E. *Technologia razrabotki programmogo obespecheniya*. SpB. Piter, 2004. 655 p.
2. Nidagundi P., Novickis L. Introducing Lean Canvas Model Adaptation in the Scrum Software Testing. *Procedia Computer Science*, 2017, Vol. 104, pp. 97-103, doi: 10.1016/j.procs.2017.01.078.
3. Satherland D. Scrum. *The Art of Doing Twice the Work in Half the Time*. Random House, 2015. 256 p.
4. Tahera K., Wynn D. C., Earl C. et al. Testing in the incremental design and development of complex products. *Res Eng Design*, 2019, Vol. 30, pp. 291–316, doi: 10.1007/s00163-018-0295-6.

5. Vavilenkova A., Litvinenko O., Zholdakov O. *Informatization Project Management*. K. NAU, 2015. 220 p.
6. Kaner C., Falk J., Nguyen H.Q. *Testing Computer Software Second Edition*. Dreamtech Press, 2000. 478 p.
7. Vavilenkova A. Analysis of flexible methodologies of software development for implementation in team projects. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7), pp. 39–46, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.06.
8. Black R. *Pragmatic Software Testing Becoming an Effective and Efficient Test Professional*. John Wiley & Sons, 2011. 366 p.
9. Gokceoglu M., Sozer H. Automated defect prioritization based on defects resolved at various project periods. *Journal of Systems and Software*, 110993, 2021, doi: 10.1016/j.jss.2021.110993.
10. Shvaber K. *Scrum. Flexible product management and business*. Alpina Publisher Ukraine, 2019. 236 p.
11. Mitchell J., Black R. *Advanced Software Testing - Vol. 3, 2nd Edition: Guide to the ISTQB Advanced Certification as an Advanced Technical*. Test Analyst Rocky Nook, Inc., 2015. 480 p.
12. Giotis T. C. How to deliver successful IT projects using MSF team model and MSF process model. Paper presented at PMI® Global Congress 2007— EMEA, Budapest, Hungary. Newtown Square, PA: Project Management Institute. Available at: <https://www.pmi.org/learning/library/deliver-project-microsoft-solutions-framework-7413> (accessed: 28.04.2021).
13. Reznik S., Byork A., Maza M. *Scrum with Team Foundation Server 2010. Professional Approach*, 2012. 416 p.
14. Breno G. Tavares, E, Carlos da Silva, Adler D. de Souza Risk Management in Scrum Projects: A Bibliometric Study, *Journal of Communications Software*, 2017, Vol. 13, 1, 1, doi: 10.24138/jcomss.v13i1.241.

Відомості про авторів (About authors)

Вавіленкова Анастасія Ігорівна – доктор технічних наук, доцент, Національний авіаційний університет, професор кафедри комп'ютеризованих систем управління ФККП; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-9630-4951; e-mail: vavilenkovaa@gmail.com.

Anastasiia Vavilenkova – DSc, Docent, Professor, Department of Computerized Control Systems, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9630-4951; e-mail: vavilenkovaa@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Вавіленкова А. І. Роль тестування програмного продукту для командної розробки. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 56-61. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.08.

Please cite this article as:

Vavilenkova A. The role of software testing for team development. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 56-61, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.08.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Вавіленкова А. І. Роль тестування програмного продукту при командній розробці. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 56-61. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.08.

АННОТАЦІЯ Стаття присвячена дослідженню особливостей процесів тестування програмного продукту в Scrum-команді. Виділені види тестування, характерні для методик гнучкого тесту. Як на етапі формування вимог до проекту і проектування, так і на етапі кодування і генерації тестових наборів. Це стає можливим при внесенні рекомендацій тестера в процес формування історій користувачів, планування виходу версій програмного продукту з точки зору тестування і дефектів, планування спринта на базі користувачів історій і дефектів, виконання спринта з неперервним тестуванням, регресивне тестування після завершення спринта і формування звітів по результатам тестування. Виділені етапи процесу гнучкого тестування в Scrum-команді. Предложено автоматизувати процес гнучкого тестування для навчального командного проекту в програмній середі Visual Studio на базі Team Foundation Server. Продемонстровано приклад автоматизації процесу гнучкого тестування шляхом його розділення на чотири квадранти з метою відповідності принципам роботи згідно гнучкої методології розробки програмного забезпечення. В першому квадранті здійснюється дослідження якості внутрішнього коду програмного продукту, тобто модульне тестування. Для цього в Visual Studio створюється нове рішення з метою генерації класу для тестування, в теле якого прописуються умови тестування. Другим квадрантом реалізують принципи системного програмування, тому на цьому етапі продемонстровано особливості створення такого тестового артефакту, як тестові випадки, що передбачають виконання певних умов для перевірки функціональності розроблюваного програмного продукту; встановлення зв'язу між створеними тестовими випадками і користувачів історіями, представленими в формі завдань командного проекту Product Backlog. Приведено приклад ручного тестування з допомогою спеціального інструмента Microsoft Test Manager, який дозволяє створювати плани, додавати і оновлювати тестові випадки, виконувати ручні тести. В третьому квадранті проделано дослідницьке тестування в Microsoft Test Manager і створено ще один тестовий артефакт – звіт про помилки. В четвертому квадранті здійснюється автоматичне тестування нефункціональних вимог до програмного забезпечення.

Ключові слова: гнучке тестування; гнучка методологія; Scrum-команда; командний проект; Product Backlog; тестовий випадок; програмне забезпечення

Надійшла (received) 01.05.2021

УДК 004.932

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.09

МЕТОД КОНТУРІВ ДЛЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ В МОБІЛЬНИХ СИСТЕМАХ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

С. Б. КОНДРАТЬЄВ¹, В. Л. КОСТЕНКО^{2*}, М. В. ЯДРОВА³

¹ кафедра проектного навчання в інформаційних технологіях, Державний університет «Одеська політехніка», Одеса, УКРАЇНА

² кафедра металорізальних верстатів, метрології та сертифікації, Державний університет «Одеська політехніка», Одеса, УКРАЇНА

³ кафедра інформаційних систем, Державний університет «Одеська політехніка», Одеса, УКРАЇНА

*e-mail: kvl777@ukr.net

АНОТАЦІЯ В роботі розглянута можливість підвищення якості технічного зору за допомогою методу контурів, який використовується для позиціонування об'єктів в мобільних системах комп'ютерного зору. Апаратна частина системи позиціонування об'єктів включає дві відеокамери, мікрокомп'ютер Raspberry Pi 3, екран контурної карти глибин, блок управління двигунами. Наведено коди програм на основі бібліотеки OpenCV, алгоритм роботи системи і приклади реалізації методу контурів. Алгоритм розробленої методики позиціонування включає виділення контурів об'єктів на кадрах стереопари, видалення всіх незамкнутих контурів, обчислення моменту (центру мас) кожного замкнутого контуру, визначення зміщення по осі x моментів відповідних контурів, заливку кожного замкнутого контуру точками з яскравістю, прямо пропорційній зміщенню моментів. Наявність двох відеокамер, мікрокомп'ютера Raspberry Pi 3, екрану контурної карти глибин забезпечує стереоскопічність і панорамності «зору», тобто можливість визначити наявність об'єктів і їх віддаленість, а також отримати загальну картину в полі «зору» системи. Наявність блоку управління двигунами дозволяє забезпечити обхід перешкод мобільними пристроями. На підставі аналізу результатів досліджень встановлено, що запропонована система забезпечує підвищення якості позиціонування об'єктів і зниження необхідного обчислювального ресурсу, що дає значне зменшення споживаної потужності і забезпечує автономність системи.

Ключові слова: метод контурів; карта глибин; комп'ютерний зір; відеокамера; позиціонування об'єктів; центр мас; бібліотека OpenCV

CONTOUR METHOD FOR POSITIONING OBJECTS IN MOBILE COMPUTER VISION SYSTEMS

S. KONDRATYEV¹, V. KOSTENKO², M. YADROVA³

¹ department of Project Training in Information Technology, Odessa Polytechnic State University, Odessa, UKRAINE

² department of Metal-cutting machines Metrology and Certification, Odessa Polytechnic State University, Odessa, UKRAINE

³ department of Information Systems, Odessa Polytechnic State University, Odessa, UKRAINE

ABSTRACT The paper considers the possibility of solving the problem of improving the quality of technical vision using the contour method, which is used to position objects in mobile computer vision systems. The hardware part of the object positioning system includes two video cameras, a Raspberry Pi 3 microcomputer, a depth contour map screen, and a motor control unit. The codes of programs based on the OpenCV library, the algorithm of the system and examples of the implementation of the contour method are given. The algorithm of the developed positioning technique includes the selection of the contours of objects on the frames of a stereopair, removal of all open contours, calculation of the moment (center of mass) of each closed contour, determination of the displacement along the x-axis of the moments of the corresponding contours, filling each closed contour with points with a brightness inversely proportional to the displacement of the moments. The presence of two video cameras, a Raspberry Pi 3 microcomputer, a contour depth map screen provides stereoscopic and panoramic "vision", that is, the ability to determine the presence of objects and their distance, as well as to get an overall picture in the "field of view" of the system. The engine control unit allows mobile devices to avoid obstacles. Based on the analysis of the research results, it was found that the proposed system provides an increase in the quality of positioning of objects and a decrease in the required computing resource, which gives a significant decrease in power consumption and ensures the autonomy of the system.

Keywords: contour method; depth map; computer vision; video camera; object positioning; center of mass; OpenCV library

Вступ

Системам технічного зору, виявлення, розпізнавання і відстеження перешкод приділено в літературі багато уваги [1,2]. Використання сучасних комп'ютерних технологій, мікропроцесорних систем

спостереження за об'єктами, включаючи збір і первинну обробку даних, істотно активізувало впровадження систем комп'ютерного зору для мобільних пристроїв [3,4], а також систем виявлення об'єкта з його візуалізацією і розпізнаванням, отримання вимірювальної і діагностичної інформації

про характеристики об'єкта [5,6]. Разом з тим, рішення широкого кола сучасних виробничих та соціально-побутових завдань за допомогою мобільних стереоскопічних систем комп'ютерного зору часто ускладнюється отриманням недостатньо якісного об'ємного зображення об'єкта, тому дослідження проблеми підвищення якості та інформативності позиціонування об'єктів є актуальними.

Аналіз існуючих наукових досліджень і публікацій

На даний момент для обходу перешкод мобільними технічними засобами, позиціонування об'єктів в просторі і визначення відстані до них широко використовується метод стереоскопічного зору двох відеокамер [7], або, в разі ультразвукового зору, ультразвукових датчиків [8], розташованих на мобільному носії і рознесених по горизонталі. Аналіз отриманого зображення проводиться за допомогою методу карти глибин [9-11] за алгоритмом, що включає вимір зсуву по осі x кожної точки правого кадру і кореляційно відповідної такої ж точки лівого кадру.

При цьому зміщення по координаті x між пікселями правої і лівої камер корелює з відстанню до об'єкта. На відстані більше 10 м зсув по осі x практично дорівнює нулю і координати точок по осі x збігаються.

Пошук відповідної кореляційної точки відбувається строго уздовж лінії горизонтального рядка кожного кадру, тому для правильного визначення відстані до об'єктів під час калібрування по вертикалі (осі y на зображенні) позиція камер встановлюється таким чином, щоб горизонтальні рядки обох камер збігалися. Калібрування по горизонталі (осі x на зображенні) проводиться за допомогою повороту камер одна щодо іншої на такий кут, коли координати точок по осі x на відстані більше 10 м збігаються, тобто даний метод вимагає позиціонування камер з точністю до пікселя як по горизонталі, так і по вертикалі, що створює проблеми при юстуванні і знижує якість позиціонування об'єктів.

Для вирішення цієї проблеми застосовують цифрове калібрування підгону положення кадру однієї з камер для поєднання об'єктів і виконання, таким чином, описаних вище вимог [12]. Отримана карта глибин надалі використовується для управління мобільними об'єктами шляхом аналізу області точок, що знаходяться ближче певної відстані. При виявленні такої області в кадрі проводиться запуск алгоритму об'їзду або зупинки мобільної системи. Даний метод хороший тим, що не вимагає навчання і перенавчання нейромереж. Комп'ютер з карти глибин отримує відстань до перешкоди, і цю перешкоду не потрібно розпізнавати, що дає можливість знизити відсоток помилок.

Однак, навіть для ідеально точного позиціонування камер, карти глибин виходять недостатньо ефективними для застосування в

мобільних системах при об'їзді перешкод. Отримані зовнішні кордони об'єктів можуть мати край складної форми, що може привести до утрудненню при їх обході.

З метою підвищення якості опису, зберігання, розпізнавання, порівняння та пошуку об'єктів, використовують також методи виділення і аналізу контурів [13,14], які включають попередню обробку зображення, бінаризацію зображення, первинну фільтрацію, забезпечують інваріантність до масштабу, сортування, а також застосування спеціальних алгоритмів [15]. Простота і швидкодія контурного аналізу дозволяють цілком успішно застосовувати даний підхід при чітко вираженому об'єкті на контрастному фоні і відсутності перешкод.

До недоліків контурного аналізу можна віднести наступні його особливості: в разі однакової яскравості з фоном об'єкт може не мати чіткої межі, або може бути зашумлений перешкодами, що призводить до неможливості виділення контуру, а перекриття об'єктів або їх угруповання призводить до того, що контур виділяється неправильно і не відповідає межі об'єкта. Контурний аналіз має досить слабку стійкість до перешкод і будь-який перетин або лише часткова видимість об'єкта призводить або до неможливості детектування, або до помилкових спрацьовувань.

Формулювання мети досліджень

Дослідження, проведені в даній статті мають на меті підвищення якості позиціонування об'єктів в просторі за рахунок підвищення чіткості їх контурів і зниження обчислювальних ресурсів при визначенні відстані до об'єкта. Впровадження результатів досліджень дозволяє забезпечити впевнене виявлення об'єктів і їх позиціонування, обхід перешкод мобільними пристроями при використанні системи комп'ютерного стереозору, а також отримувати достовірну інформацію про об'єкти для інших систем, що використовують в своєму функціонуванні технічний зір.

При досягненні мети досліджень були поставлені наступні завдання:

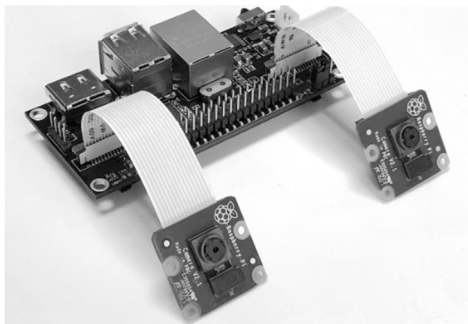
- визначення основних етапів побудови контурів для визначення відстані до об'єктів;
- розробка програмно-апаратної частини підсистеми позиціонування об'єкту;
- експериментальна перевірка макету системи комп'ютерного стереозору.

Виклад основного матеріалу досліджень

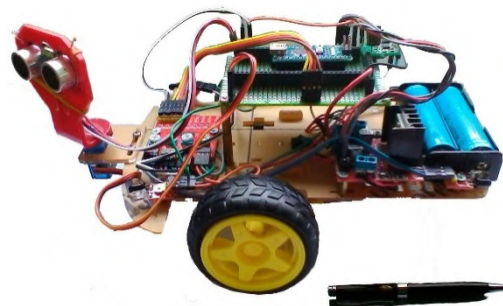
Для реалізації поставлених цілей була розроблена система комп'ютерного зору, структурна схема апаратної частини якої приведена на рис.1 а. Плата *Raspberry Pi 3* з підключеними відеокамерами приведена на рис.1 б, мобільна платформа – на рис. 1 в.



а



б



в

Рис. 1 – Система комп'ютерного зору: а – структурна схема апаратної частини системи; б – плата Raspberry Pi 3 з підключеними відеокамерами; в – мобільна платформа

Апаратна частина підсистеми позиціонування об'єктів включає дві відеокамери, мікрокомп'ютер, екран контурної карти глибин, блок керування двигунами (рис. 1 а). Мобільна система розроблена на базі мобільної платформи, яка описана в [16]. З урахуванням оптимального співвідношення ціни і експлуатаційних характеристик, в системі використовується одноплатний комп'ютер *Raspberry Pi 3* і *Stereo Pi* відеокамери з характеристиками: 8 Мп, 1080 п / 720 п. [17,18]. Система отримує напругу від автономного елемента живлення. Алгоритм роботи системи наведено на рис. 2.

На підставі наведеного алгоритму було виділено п'ять основних операцій:

1. Виділення контурів об'єктів на кадрах стереопари.

При цьому виділяються не тільки окремі об'єкти, але і фон цих об'єктів (рис. 3).

2. Після отримання картини контурів кожен контур перевіряється на замкнутість за допомогою флага *CV_SEQ_FLAG_CLOSED*.

Слід зазначити, що алгоритм виділення контурів не завжди розпізнає тільки замкнуті контури, і це може стати причиною зникнення цілих об'єктів з поля зору. Розробка сталого методу виділення зовнішніх контурів об'єктів теоретично не вирішена для всіх випадків, і розробники творчо підходять до цього рішення, наприклад, можна ітеративно змінювати поріг фільтра *Canny* та виконувати морфологічне закриття до тих пір, поки не буде знайдено замкнутий контур.

Вид отриманих кадрів наведено на рис. 4.

Після побудови всіх знайдених контурів незамкнуті контури видаляються (рис. 4 а) так як їх неможливо заповнити точками з рівнем яскравості, обернено пропорційним відстані - заливка «розтікається» на весь кадр.

3. У решти замкнутих контурів визначають «центри мас» за допомогою функції *cv2.moments (cnt)*. На рис. 4 б «центри мас» позначені точками.

Вид кадру на етапі зміщення по осі *x* між центрами мас однакових контурів в лівому і правому кадрі відеокамер системи представлено на рис. 4 в.

4. Вид кадру отриманого зображення на етапі заповнення точками, яскравість яких прямо пропорційна зсуву між центрами мас контурів і обернено пропорційна відстані до об'єкта представлено на рис.4 г.

Для реалізації алгоритму використана бібліотека *OpenCV* [19].

Для пошуку контурів використана функція *cvFindContours ()*, при цьому функція *cvFindContours ()* може знаходити зовнішні і вкладені контури і визначати їх ієрархію вкладення, а відобразити знайдені контури можна за допомогою функції *cvDrawContours ()*.

Якщо задати параметром функції метод *CV_CHAIN_CODE*, то *cvFindContours ()* поверне ланцюговий код Фрімана, працювати з яким можна з використанням методів:

```
CVAPI(void) cvStartReadChainPoints(CvChain* chain, CvChainPtReader* reader);
```

```
CVAPI(CvPoint) cvReadChainPoint(CvChainPtReader* reader).
```

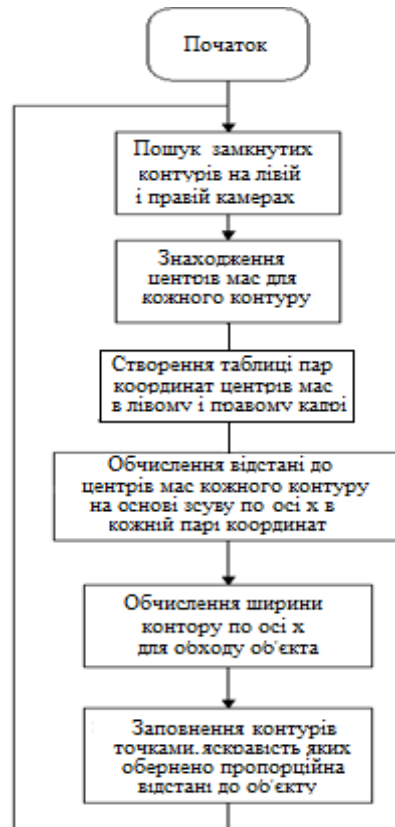



Рис. 2 – Алгоритм роботи системи

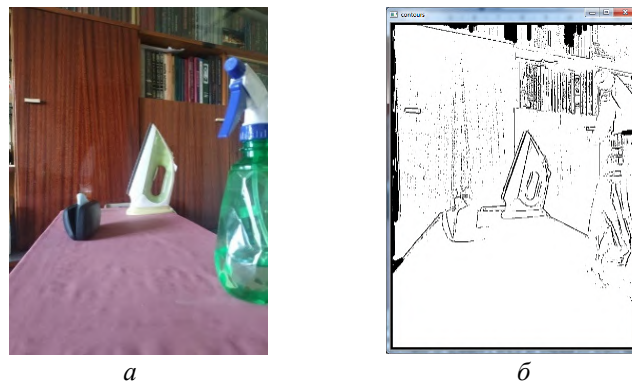


Рис. 3 – Кадри стереопари: а – реальний кадр; б – кадр у вигляді виділених контурів

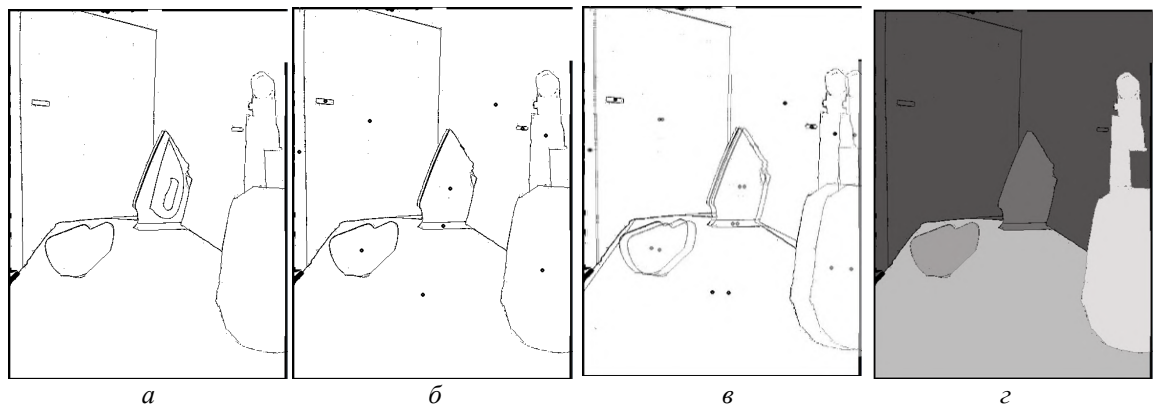


Рис. 4 – Кадри зображення: а – після видалення незамкнених контурів; б – з «центрами мас»; в – визначення зміщення по осі x між центрами мас однакових контурів в лівому і правому кадрі; г) – заповнення контурів точками, яскравість яких обернено пропорційна відстані до об'єкту

Для отримання вихідного 8-бітного одноканального зображення (ненульові пікселі обробляються як логічна одиниця, а нульові як логічний нуль) з градацій сірого можна, наприклад, використовувати функції `cvThreshold()` або `cvCanny()`. Слід зазначити, що функція `cvFindContours()` може знаходити зовнішні і вкладені контури і визначати їх ієрархію вкладення. При цьому відобразити знайдені контури можна за допомогою функції `cvDrawContours()`:

```
VAPI(void) cvDrawContours( CvArr *img,
CvSeq* contour;
CvScalarexternal_color, CvScalarhole_color;
intmax_level, int thickness CV_DEFAULT(1);
intline_type CV_DEFAULT(8);
CvPoint offset CV_DEFAULT(cvPoint(0,0))).
```

Основна частина програми виділення контурів і їх прорисовка в кадрі має наступний вигляд:

```
#-----
# права камера
#-----
# find contours in the thresholded image
cnts = cv.findContours(threshRight.copy(), cv.RETR_EXTERNAL, cv.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
cnts = imutils.grab_contours(cnts)
# loop over the contours
for c in cnts:
moments = cv.moments(c)# compute the center of the contour
dM01 = moments['m01']
dM10 = moments['m10']
dArea = moments['m00']

# виділяємо моменти, які містять контури з площею більше 400 пікселів
if dArea > 400:
x = int(dM10 / dArea)
y = int(dM01 / dArea)
cv.circle(imgRight, (x, y), 5, (0, 255, 0), -1) # точка центру мас контура наimgRight
cv.circle(imgLeft, (x, y), 5, (0, 255, 0), -1) #точка центру мас на imgLeft
cv.drawContours(imgRight, [c], -1, (0, 255, 0), 1) #контур наimgRight
cv.drawContours(imgLeft, [c], -1, (0, 255, 0), 1) #контур наimgLeft
cv.imshow("contoursRight", imgRight) # виводимо підсумкове зображення у вікно
```

Для лівої камери все робиться аналогічно, тільки в картинку для лівої камери вже прорисовані контури і центри мас з правого камери для контролю розбіжності центрів мас. Розбіжність центрів мас використовується для обчислення відстані до контуру.

Слід зазначити, що запропонований метод дозволяє огинати об'єкти при використанні системи

стереозору на пересувних платформах (мобільних пристроях). Робота з картою контурів при об'їзді відбувається наступним чином: в зображенні карти контурів виділяється область (рис. 5), яка відповідає зовнішнім розмірам пересувної платформи, її правим і лівим краям (бортам). Можна назвати її «областю бортів платформи».

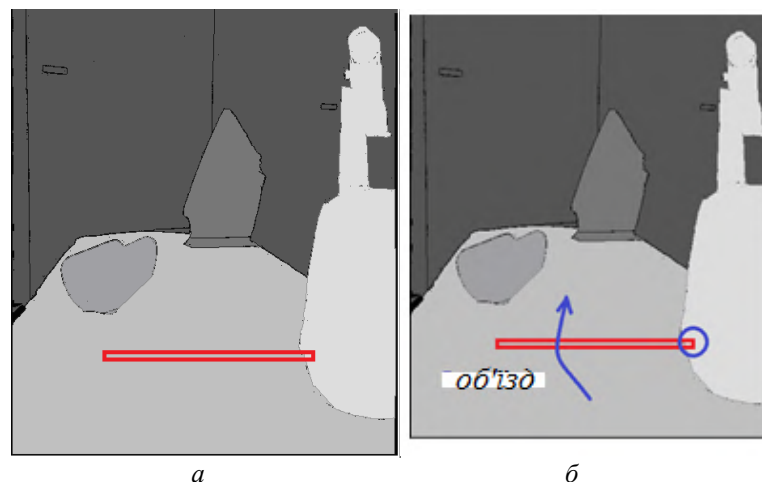


Рис. 5 – Вид контурів, що пояснює об'їзд об'єктів при використанні системи стереозору на мобільних пристроях: а – визначення відстані до перешкоди; б – формування шляхів об'їзду

Всередині прямокутника перевіряється рівень яскравості всіх його точок, що визначають відстань до перешкоди (рис 5 а), кількість яких невелика, що знижує навантаження на обчислювальні ресурси. У програмі перевірки рівня яскравості встановлено поріг яскравості, при перевищенні якого робиться висновок, що об'єкт знаходиться надто близько (чим яскравіше об'єкт, тим ближче). Далі, в залежності від координат небезпечного контуру в області бортів платформи – справа, зліва, по центру, формується рішення про шляхи об'їзду перешкоди (контуру) – об'їзд справа, зліва тощо. На рис. 5 б формується об'їзд перешкоди зліва.

З метою зменшення завантаження процесора за рахунок зменшення площі оброблюваної картини, запропоновано обмеження кадру по вертикалі і обмеження області виділення контурів.

Код програми обмеження для правої камери має наступний вигляд:

```
# Camerasettings
```

```
camWidth = 1280 # розмір кадру по горизонталі
```

```
camHeight = 240 # зменшений розмір кадру по вертикалі
```

Висновки

Розглянуто проблему підвищення якості комп'ютерного стереозору. Розроблено систему позиціонування об'єктів в просторі, що дозволяє підвищити точність позиціонування. Запропонована система позиціонування об'єктів за своїми функціональними можливостями займає проміжне положення між далекоміром, тобто покажчиком відстані до виділеного одного об'єкта і картою глибин, визначення для якої дано, як «карта відстаней для кожної точки».

Дана система виділяє безліч об'єктів і формує карту глибин до кожного з них, при цьому запропонований контурний метод обробки стереозображень реалізує карту відстаней (глибин) до виділених об'єктів, а не точок зображення. Для обходу перешкод мобільним пристроєм, з запропонованою системою технічного зору, такої інформації достатньо.

Зниження навантаження на процесор при контурному методі має місце тому, що основна робота йде не з кожною точкою зображення, а з набором контурів, тобто об'єктів, кількість яких значно менше обсягу масиву точок зображення. При цьому контури не кодують масивом всіх точок, з яких вони складаються, а апроксимуються ламаними лініями, і зберігаються не всі точки ліній, а тільки точки перегинів. Контур зберігається як багатокутник, при цьому запам'ятовуються лише координати його кутів, а лінії, що з'єднують між собою кути, добуваються при виведенні контуру на екран.

Різке (в 2–3 рази) зниження обчислювальної навантаження при роботі з контурами дає значне зниження (на 30–50%) споживаної потужності, що дає

можливість роботи з автономним джерелом живлення в мобільних системах з комп'ютерним стереозором.

Розроблено алгоритм роботи системи. Програмна частина підсистеми позиціонування об'єктів реалізована на основі бібліотеки *OpenCV* і забезпечує досягнення поставленої в роботі мети. Програмним шляхом формується спільна робота двох відеокамер з метою отримання інформації про відстань до об'єкта і його габаритах.

На основі даних досліджень був зібраний і випробуваний макет пристрою з автономним елементом живлення 5 В, в якості якого може бути використаний, на розсуд користувача, стандартний *PowerBank*, портативний блок живлення, зовнішній акумулятор. Струм споживання системи, в залежності від складності, знаходиться в межах 500–800 мА, тобто споживана потужність становить 2,5–4 Вт.

Наявність двох відеокамер, мікрокомп'ютера *Raspberry Pi 3*, екрану контурної карти глибин забезпечує стереоскопічність і панорамності «зору», тобто можливість визначити наявність об'єктів і їх віддаленість, а також отримати загальну картину в полі «зору» системи. Наявність блоку управління двигунами дозволяє забезпечити обхід перешкод мобільними пристроями.

На підставі аналізу результатів досліджень встановлено, що запропонована система забезпечує підвищення якості позиціонування об'єктів і зниження необхідного обчислювального ресурсу, що дає значне зменшення споживаної потужності і забезпечує автономність системи.

Впровадження результатів досліджень дозволяє забезпечити впевнене виявлення об'єктів і їх позиціонування, об'їзд перешкод мобільними пристроями, а також дає можливість отримувати достовірну інформацію про об'єкти для інших систем, що використовують в своєму функціонуванні технічний зір.

Список літератури

1. Vinh Dinh Nguyen, Hau Van Nguyen, Dinh Thi Tran, Sang Jun Lee, Jae Wook Jeon. Learning framework for robust obstacle detection, recognition, and tracking. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2016. 18 (6). P. 1633-1646. doi: 10.1109/TITS.2016.2614818.
2. Костенко В. Л., Кондратьев С. Б., Ядрова М. В., Стельмах Д. Е. Квазистереоскопическая система обнаружения препятствий для слепых на базе RASPBERRY PI 3 и STM8L. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 64–75. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.09.
3. Sergeeva O., Lusenko V., Dubovick T. & Patalakha M. 2020. Development of a Wi-Fi controlled mobile video device on the Arduino NANO basis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 3. 9 (105). P. 55–60. doi: 10.15587/1729-4061.2020.206558.
4. Костенко В. Л., Кондратьев С. Б., Ядрова М. В., Попов Д. О. Энергоэффективная система панорамного ультразвукового обнаружения препятствий для слепых.

- Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2018. №16 (1292). С. 47–56. doi:10.20998/2413-4295.2018.16.07
5. Cuong Cao Pham, Jae Wook Jeon. Robust object proposals re-ranking for object detection in autonomous driving using convolutional neural networks. *Signal Processing: Image Communication*. 2017. 53. P. 110–122. doi: 10.1016/j.image.2017.02.007.
 6. Udovenko S. & Sorokin A. Локалізація і навігація мобільних роботів в середі з змінюваними властивостями. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 2. 9 (98). P. 29–36. doi: 10.15587/1729-4061.2019.164337.
 7. Смирнов А. В., Беззубцев А. Ю. Обход препятствий подвижными техническими средствами с использованием стереозрения. *Программные системы: теория и приложения*. 2016. №4 (31). С. 331–346.
 8. Попов Д. А., Костенко В. Л., Ядрова М. В., Кондратьев С. Б. Разработка мультисенсорного сонара для слепых на основе микроконтроллера stm8L. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2018. № 30–31. С. 126–131.
 9. Sebastiano Battiato, Salvatore Curti, Marco La Cascia, Marcello Tortora and Emiliano Scordato. Depth map generation by image classification. *In Proceedings of SPIE*. 2004. Vol. 5302. P. 95–104. doi: 10.1117/12.526634.
 10. Asra Aslam, Mohd. Samar Ansari. Depth-Map Generation using Pixel Matching in Stereoscopic Pair of Images. arXiv:1902.03471v3 [cs.CV]. 15 May 2019.
 11. Fahmy A. A., Ismail O and Al-Janabi A. K. Stereovision based depth estimational gorithminun calibrated rectification. *International Journal of Video & Image Processing & Network Security*. 2013. 13(2).
 12. Учет влияния дестабилизирующих факторов для повышения точности измерений дальномера на основе стереоизображений. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uchet-vliyaniya-destabiliziruyuschih-faktorov-dlya-povysheniya-tochnosti-izmereniy-dalnomera-na-osnove-sterеоizobrazheniy> (дата звернення 05.02.2021).
 13. Поиск области контура OpenCV. URL: <https://www.rupython.com/opencv-22-34417.html> (дата звернення 06.02.2021).
 14. Ruban I., Khudov N., Makoveichuk O., Chomik M., Khudov V., Khizhnyak I., Podlipaiev V., Sheviakov Y., Baranik O., & Irkha A. Разработка методов определения контуров объектов на тоновых аэрокосмических изображениях на основе муравьиных алгоритмов. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 5. 9 (101). P. 25–34. doi: 10.15587/1729-4061.2019.177817.
 15. Как отобразить контуры изображения с помощью Open CV Python? URL: <https://overcoder.net/q/1003887/как-отобразить-контуры-изображения-с-помощью-оренсв-python> (дата звернення 05.02.2021).
 16. Інформаційні технології діагностування та вдосконалення енергетичного обладнання і умов його експлуатації: монографія / О. О. Арсірій та ін.; за ред. О. О. Арсірій: монографія – Одеса: Бондаренко М. О. 2019. 158 с. ISBN 978-617-7613-45-8.
 17. Installation – Raspberry Pi Documentation. URL: <https://www.raspberrypi.org/documentation/installation/> (дата звернення 05.02.2021).
 18. Best Raspberry Pi Accessories of 2021. URL: <https://www.tomshardware.com/best-picks/best-raspberry-pi-accessories> (дата звернення 05.02.2021).
 19. Open Source Computer Vision Library. GitHub. URL: <https://github.com/opencv/opencv> (дата звернення 03.02.2021).

References (transliterated)

1. Vinh Dinh Nguyen, Hau Van Nguyen, Dinh Thi Tran, Sang Jun Lee, Jae Wook Jeon. Learning framework for robust obstacle detection, recognition, and tracking. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 18 (6), pp. 1633-1646, doi: 10.1109/TITS.2016.2614818.
2. Kostenko, V., Kondratyev, S., Yadrova, M., Stelmakh, D. Quasistereoscopic obstacle detection system for the blind on the basis RASPBERRY PI 3 and STM8L. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 64–75, doi:10.20998/2413-4295.2020.02.09.
3. Sergejeva O., Lusenko V., Dubovick T. & Patalakha M. 2020. Development of a Wi-Fi controlled mobile video device on the Arduino NANO basis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, 3, 9 (105), pp. 55–60, doi: 10.15587/1729-4061.2020.206558.
4. Kostenko, V., Kondratyev, S., Yadrova, M., Popov, D. Energy efficient system of panoramic ultrasonic obstruction obstacles for the blind. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 16 (1292), pp. 47-56, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.07.
5. Cuong Cao Pham, Jae Wook Jeon. Robust object proposals re-ranking for object detection in autonomous driving using convolutional neural networks. *Signal Processing: Image Communication*, 2017, 53, pp. 110–122, doi: 10.1016/j.image.2017.02.007.
6. Udovenko S. & Sorokin A. 2019. Lokalizaciya i navigaciya mobil'nyh robotov v srede s izmenyaemyimi svojstvami. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, 2, 9 (98), pp. 29–36, doi: 10.15587/1729-4061.2019.164337.
7. Smirnov A. V., Bezzubcev A. Yu. Obhod prepyatstvij podvizhnyimi tekhnicheskimi sredstvami s ispol'zovaniem stereozreniya. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya*, 2016, 4 (31), pp. 331–346.
8. Popov D. A., Kostenko V. L., Yadrova M. V., Kondrat'ev S. B. Razrabotka mul'tisensornogo sonara dlya slepyh na osnove mikrokontrollera stm8L. *Komp'yuterno-integrovani tekhnologii: osvita, nauka, virobnictvo*, 2018, 30–31, pp. 126–131.
9. Sebastiano Battiato, Salvatore Curti, Marco La Cascia, Marcello Tortora and Emiliano Scordato. Depth map generation by image classification. *In Proceedings of SPIE*, 2004, 5302, pp. 95–104, doi: 10.1117/12.526634.
10. Asra Aslam, Mohd. Samar Ansari. Depth-Map Generation using Pixel Matching in Stereoscopic Pair of Images. arXiv:1902.03471v3 [cs.CV] 15 May 2019.
11. Fahmy A. A., Ismail O and Al-Janabi A. K. Stereovision based depth estimational gorithminun calibrated rectification. *International Journal of Video & Image Processing & Network Security*, 2013, 13(2).
12. Uchet vliyaniya destabiliziruyuschih faktorov dlya povysheniya tochnosti izmereniy dal'nomera na osnove stereoisobrazhenij. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/uchet-vliyaniya-destabiliziruyuschih-faktorov-dlya->

- povysheniya-tochnosti-izmereniy-dalnomera-na-osnove-stereoizobrazheniy (accessed 05.02.2021).
13. Poisk oblasti kontura OpenCV. Available at: <https://www.rupython.com/opencv-22-34417.html> (accessed 06.02.2021).
 14. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Chomik M., Khudov V., Khizhnyak I., Podlipaev V., Sheviakov Y., Baranik O., & Irkha A. 2019. Razrabotka metodov opredeleniya konturov ob'ektov na tonovyh aerokosmicheskikh izobrazheniyah na osnove murav'inyh algoritmov. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, 5, 9 (101), pp. 25–34, doi: 10.15587/1729-4061.2019.177817.
 15. Kak otobrazit' kontury izobrazheniya s pomoshch'yu Open CV Python? Available at: <https://overcoder.net/q/1003887/>
 16. Informacijni tekhnologii diagnostuvannya ta vdoskonalennya energetichnogo obladnannya i umov jogo ekspluatatsii: monografiya. O. O. Arsirij ta in.; za red. O. O. Arsirij: monografiya. Odessa. Bondarenko M. O. 2019. 158 s.
 17. Installation – Raspberry Pi Documentation. Available at: <https://www.raspberrypi.org/documentation/installation/> (accessed 05.02.2021).
 18. Best Raspberry Pi Accessories of 2021. Available at: <https://www.tomshardware.com/best-picks/best-raspberry-pi-accessories> (accessed 05.02.2021).
 19. Open Source Computer Vision Library. GitHub. Available at: <https://github.com/opencv/opencv> (accessed 03.02.2021).

Відомості про авторів (About authors)

Кондратьев Сергей Борисович – старший викладач, кафедра проектного навчання в інформаційних технологіях, Державний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна; ORCID: 0000-0003-4975-5757; e-mail: kondratyev@opu.ua

Sergey Kondratyev – Senior Lecturer, Odessa Polytechnic State University, department of Project Training in Information Technology, Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4975-5757; e-mail: kondratyev@opu.ua

Костенко Віталій Леонідович – доктор технічних наук, професор, Державний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна; професор кафедри металорізальних верстатів, метрології та сертифікації; Одеса, Україна; ORCID: 0000-0002-8922-4232; e-mail: kv1777@ukr.net

Vitaliy Kostenko – doctor of Technical Sciences, Professor, Odessa Polytechnic State University, department of Metal-cutting machines Metrology and Certification; Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8922-4232; e-mail: kv1777@ukr.net

Ядрова Марина Василівна – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет «Одеська політехніка», доцент кафедри інформаційних систем, Одеса, Україна; ORCID: 0000-0001-7517-496X; e-mail: yadrova@opu.ua

Marina Yadrova – Associate Professor, Odessa Polytechnic State University, department of Information Systems, Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7517-496X; e-mail: yadrova@opu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Кондратьев С. Б., Костенко В. Л., Ядрова М. В. Метод контурів для позиціонування об'єктів в мобільних системах комп'ютерного зору. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 62-69. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.09.

Please cite this article as:

Kondratyev S., Kostenko V., Yadrova M. Contour method for positioning objects in mobile computer vision systems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 62-69, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.09.

Пожадується, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Кондратьев С. Б., Костенко В. Л., Ядрова М. В. Метод контуров для позиционирования объектов в мобильных системах компьютерного зрения. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 62-69. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.09.

АННОТАЦІЯ В работе рассмотрена возможность повышения качества технического зрения с помощью метода контуров, который используется для позиционирования объектов в мобильных системах компьютерного зрения. Аппаратная часть системы позиционирования объектов включает две видеокамеры, микрокомпьютер Raspberry Pi 3, экран контурной карты глубин, блок управления двигателями. Приведены коды программ на основе библиотеки OpenCV, алгоритм работы системы и примеры реализации метода контуров. Алгоритм разработанной методики позиционирования включает выделение контуров объектов на кадрах стереопары, удаление всех незамкнутых контуров, вычисление момента (центра масс) каждого замкнутого контура, определение смещения по оси x моментов соответствующих контуров, заливку каждого замкнутого контура точками с яркостью, прямо пропорциональной смещению моментов. Наличие двух видеокамер, микрокомпьютера Raspberry Pi 3, экрана контурной карты глубин обеспечивает стереоскопичность и панорамность «зрения», т. е. возможность определить наличие объектов и их удаленность, а также получить общую картину в поле «зрения» системы. Наличие блока управления двигателями позволяет обеспечить обход препятствий мобильными устройствами. На основании анализа результатов исследований установлено, что предложенная система обеспечивает повышение качества позиционирования объектов и снижение необходимого вычислительного ресурса, что дает значительное уменьшение потребляемой мощности и обеспечивает автономность системы.

Ключевые слова: метод контуров; карта глубин; компьютерное зрение; видеокамера; позиционирование объектов; центр масс; библиотека OpenCV

Надійшла (received) 29.04.2021

УДК 004.924:614.8

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.10

КРИТЕРІЙ АКТУАЛЬНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ПРИ РОЗВ'ЯЗАННІ ЗАДАЧІ КОМПЛЕКТУВАННЯ АВАРІЙНО-РЯТУВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

В. М. КРИШТАЛЬ¹, В. Є. СНИТЮК², Д. С. ФЕДОРЕНКО¹

¹ кафедра пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, УКРАЇНА

² факультет інформаційних технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, УКРАЇНА
*e-mail: kryshstal.v@ukr.net

АНОТАЦІЯ Проаналізовано проблему комплектування аварійно-рятувальної техніки, що засвідчив такі її особливості як наявну обмеженість фінансових ресурсів, значний зріст потужності елементної бази, прийняття рішень виключно на основі досвіду та інтуїції відповідальних осіб. Показано, що запропоновані раніше рішення базувалися на урахуванні вартості обладнання, його надійності, функціональності та потужності, водночас поза увагою залишався аспект його застосовності або актуальності. Враховуючи значну кількість потенційних елементів обладнання, що можуть входити до комплекту, запропоновано обмеження, що дозволять скоротити кількість можливих варіантів на основі методу послідовного аналізу варіантів. Запропоновано визначати пріоритетність елементів обладнання певного класу із використанням методу аналізу ієрархій на основі встановлення пріоритетності критеріїв і процедур визначення компетентності експертів. Оскільки задача комплектування є багатокритеріальною, то до критеріїв визначення оптимального комплекту запропоновано включити критерій актуальності. Побудовано моделі показників актуальності обладнання, а також визначено коефіцієнт актуальності елемента обладнання та розроблено модель для визначення коефіцієнта актуальності комплекту аварійно-рятувального обладнання для певної надзвичайної ситуації. Запропоновано розраховувати загальний коефіцієнт актуальності комплекту обладнання для усіх надзвичайних ситуацій як усереднене значення коефіцієнта актуальності комплекту для кожної надзвичайної ситуації при умові їх рівнозначності, або як зважене значення в іншому випадку. Проведене чисельне моделювання на основі розробленого алгоритму дозволило зробити висновки про актуальність та, як наслідок, пріоритетність елементів обладнання, а також оцінити ступінь забезпеченості аварійно-рятувального підрозділу аварійно-рятувальним обладнанням при різних надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: надзвичайні ситуації; аварійно-рятувальне обладнання; комплектування; критерій актуальності; модель для визначення коефіцієнта актуальності комплекту аварійно-рятувального обладнання; пріоритетність елементів обладнання.

CRITERIA OF ACTUALITY OF EQUIPMENT IN SOLVING OF THE PROBLEM OF COMPLETING OF EMERGENCY AND RESCUE EQUIPMENT IN THE CONDITIONS OF UNCERTAINTY

V. KRYSH TAL¹, V. SNYTYUK², D. FEDORENKO¹

¹ Department of Fire Tactics and Emergency Rescue, Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, UKRAINE

² Faculty of Information Technologies, Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The problem of rescue equipment compilation was analyzed, which showed such features as the existing limited financial resources, a significant increase in the capacity of the element base, decision making processes based solely on the experience and intuition of those responsible person was carried out. It is shown that the previously proposed solutions were based on the cost of equipment, its reliability, functionality and capacity, while the aspect of its applicability or relevance was ignored. Taken into account the significant number of potential elements of equipment that may be included in the kit, limitations that will reduce the number of possible variants based on the method of sequential analysis of variants are proposed. It is proposed to determine the priority of equipment elements of a certain class using the method of analytic hierarchy process on the prioritization of criteria and procedures for determining the competence of experts. Since the task of compilation is multi-criteria, it is proposed to include the criterion of relevance in the criteria for determining the optimal kit. Models of equipment relevance indicators are constructed, as well as the relevance rate of the equipment element is determined and a model to determine the relevance rate of the set of emergency rescue equipment for a certain emergency situation is developed. It is proposed to calculate the total relevance rate of the equipment set for all emergencies as the average value of the relevance rate of the kit for each emergency, provided they are equivalent, or as a weighted value otherwise. Numerical modeling based on the developed algorithm allowed to draw conclusions about the relevance and, as a consequence, the priority of equipment elements, as well as to assess the degree of provision of

Keywords: emergency situations; rescue equipment; compilation; criterion of relevance; a model for determining the relevance factor of a set of rescue equipment; priority of equipment elements.

Вступ

Проблема комплектування аварійно-рятувальної техніки (АРТ) є наслідком протиріччя між ресурсною обмеженістю, а також обмеженістю носія та необхідністю забезпечення універсальності й максимальної потужності та надійності аварійно-рятувального обладнання (АРО). Від якісного та ефективного її вирішення залежать людські життя та обсяги матеріальних збитків внаслідок аварій, катастроф та пожеж.

Типовим представником АРВ є пожежний або спеціальний автомобіль, де АРО розміщується у спеціальних контейнерах, які, без обмеження загальності можна вважати прямокутними паралелепіпедами. Проблема комплектування на практиці вирішується особою, що приймає рішення, на основі досвіду, інтуїції та з урахуванням фінансових обмежень, що не завжди є найкращим варіантом. На необхідність об'єктивізації процесу її вирішення вказує і багатокритеріальність вибору із великої кількості варіантів та змішаність суб'єктивізованих експертних оцінок.

Розробка моделей та методів, які дозволять вирішити проблему комплектування АРТ, необхідна у тому числі й для того, щоб продовжити процеси щодо переходу викликів усіх рятувальних служб на номер 112 та автоматизації діяльності підрозділів Державної служби із надзвичайних ситуацій України. Значна кількість релевантних задач уже має своє розв'язання, зокрема задачі визначення найкоротшого шляху проїзду пожежного автомобіля до місця пожежі, визначення ймовірного шляху розвитку пожежі, оптимізація розміщення елементів системи пожежної сигналізації, визначення рівня пожежонебезпечності житлових будинків та інші. Дослідження, одним з яких і є розробка технології комплектування АРТ, проводяться у Черкаському інституті пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України.

Для вирішення даної проблеми були поставлені задачі [1], встановлені обмеження, запропоновані відповідні методи. Зауважимо, що одержані результати базуються на представленні процесу комплектування АРТ як задачі багатокритеріальної оптимізації [2], що має багато спільного із задачами тривимірної упаковки [3], задачі про рюкзак [4], задачі розкрою [5] тощо. Водночас, жорсткі обмеження та критерії, частина з яких має чіткий кількісний характер, а інша частина – якісний, що властиві задачі комплектування АРТ, визначають особливості її розв'язання. У запропонованих раніше моделях та методах [6] не використовувались знання про особливості навколишнього середовища, статистичні дані про надзвичайні ситуації та їх наслідки. Очевидно, що такі дані є визначальними

при комплектуванні носіїв АРТ, серед яких є як спеціальні автомобілі, так і пожежні машини.

Надалі, без обмеження загальності, будемо розглядати пожежні автомобілі, оскільки вони, як носії АРО, кількісно переважають. Для інших автомобілів запропоновані результати також можна використовувати, обмеживши лише номенклатуру та тип обладнання.

Визначимо основні об'єкти, які відіграють визначальну роль при комплектуванні АРТ. Першим таким об'єктом є навколишнє середовище, в якому планується експлуатація пожежного автомобіля з відповідним комплектом АРО. Таким середовищем може бути село, місто, район чи область. Зауважимо, що чим більш спеціалізованим є автомобіль, тим ширшим є середовище його використання. Відповідний регіон визначається соціально-економічними характеристиками, головними з яких є кількість населення, величина валового внутрішнього продукту, середня заробітна плата, відсоток безробітних, кількість працюючих підприємств, характеристики виробництва та кількісні характеристики житлового фонду.

Мета роботи

Метою роботи є підвищення ефективності проведення аварійно-рятувальних робіт та, як наслідок, мінімізація кількості людських жертв та обсягу матеріальних збитків шляхом об'єктивізації процесів прийняття рішень при комплектуванні аварійно-рятувальної техніки. Мета дослідження досягається у результаті розв'язання задачі побудови критерію актуальності комплекту аварійно-рятувального обладнання.

Метод побудови критерію актуальності аварійно-рятувального обладнання

Відомо, що можливі небезпеки (R) для регіонів класифікують таким чином [7]:

- небезпеки соціального характеру (R_1);
- небезпеки техногенного характеру (R_2);
- пожежі (R_3);
- небезпеки природного характеру (R_4);
- інші небезпеки (R_5).

Кожен клас небезпек, у свою чергу, ділиться на ситуації, аварії чи катастрофи. Тому, кожну надзвичайну ситуацію будемо позначати R_{ij} , де i – клас ситуації, $i = \overline{1,5}$, j – номер ситуації в класі, $j = \overline{1,1}$.

Припустимо, що всього може бути одержано N комплектів обладнання. Кожен комплект K_i обладнання має однакову кількість елементів (EO), $i = \overline{1, M}$, причому кожен елемент належить до певного класу АРО. Позначимо класи АРО $C_j, j = \overline{1, M}$ і

вважатимемо, що $\forall i, j, i \neq j: C_i \cap C_j = \emptyset$. Такі припущення мають спрощуваний характер, але не обмежують загальності, оскільки їх можна послабити.

Розглянемо першу задачу. Припустимо, що в кожному комплекті обладнання є M ЕО, потужність класів відома і становить $|C_j| = m_j, \forall j \in \{1, 2, \dots, M\}$. Тоді загальна кількість комплектів становитиме

$$L = \prod_{j=1}^M m_j.$$

Як правило, число L є великим і здійснити вибір оптимального комплекту за багатьма критеріями – процедура надто трудомістка. Тому, необхідно скоротити їх кількість, застосовуючи кроки, аналогічні крокам методу послідовного аналізу варіантів [8]. На першому кроці вилучимо ті комплекти, в яких хоча б один елемент має хоча б один габарит, який є більшим найбільшого габариту контейнера, тобто, якщо

$$\exists e_j: \max\{a_j, b_j, c_j\} > \max\{a, b, c\}, \quad (1)$$

то комплект вилучаємо з розгляду. У виразі (1) e_j – j -й ЕО в комплекті, a_j, b_j, c_j – його ширина, висота і глибина, a, b, c – ширина, висота і глибина контейнера, відповідно. На другому кроці вилучаємо ті комплекти, сумарні найменші габарити яких є більшими найбільшого габариту контейнера, тобто, якщо

$$\sum_{j=1}^M \min\{a_j, b_j, c_j\} > \max\{a, b, c\}. \quad (2)$$

І третя умова: якщо існує такий комплект обладнання E_j , що

$$F_1^j > F_{1\max})V(F_2^j < F_{2\max})V(F_3^j < F_{3\max})V(V(F_4^j < F_{4\max})V(F_5^j < F_{5\max}), j = \overline{1, L},$$

де $F_{1\max}$ – максимально можливе значення ціни, $F_{i\min}$ – мінімально можливі значення інших критеріїв (надійність, потужність, функціональність, невраховані фактори), $i = \overline{2, 5}$, то комплект теж вилучаємо. У результаті виконання таких дій кількість можливих комплектів значно скоротиться.

Впорядкуємо елементи кожного класу всередині класу. Припустимо, що клас C_j має m_j елементів, елемент класу позначимо $E_{jk}, k = \overline{1, m_j}, j = \overline{1, M}$. Експертним шляхом, використовуючи метод аналізу ієрархій [9], визначимо пріоритети w_i критеріїв $F_i, i = \overline{1, 5}$. Далі розрахуємо пріоритети v_{jki} кожного елемента класу e_{jk} за кожним із критеріїв $F_i, i = \overline{1, 5}$. Зауважимо, що значення пріоритетів потрібно нормувати, тоді одержимо, що $\sum_{i=1}^5 w_{ji} = 1$ і $\forall i \in \{1, 2, \dots, 5\} \sum_{k=1}^{m_j} v_{jki} = 1, j = \overline{1, m}$. Загальні

значення пріоритетів елементів e_{jk} класу C_j знаходимо так:

$$\gamma_k = \sum_{i=1}^5 w_{ji} \cdot v_{jki}, k = \overline{1, m_j} \quad (3)$$

Після нормування $\gamma'_k \in (0, 1)$ і $\sum_{k=1}^{m_j} \gamma'_k = 1$. Знаючи пріоритети ЕО кожного класу, їх можна впорядкувати за спаданням пріоритетів. Якщо наведену вище процедуру виконував один експерт, то комплект обладнання, який складається з перших елементів у своїх впорядкованих класах, буде шуканим. Якщо з певних причин він виявиться неприйнятним, то необхідно вилучити найгірший елемент з найкращих та замінити його на наступний за рангом у цьому класі. У випадку негативних результатів цю процедуру необхідно повторити.

Якщо в оцінюванні та впорядкуванні альтернатив бере участь декілька експертів, то побудовані ними індивідуальні порядки на множині ЕО та значення пріоритетів будуть відрізнятися. Одним із варіантів розв'язання задачі є апріорне визначення компетентності експертів. У залежності від рівня знань особи, що приймає рішення (ОПР), та інформації про самих експертів, розрізняють процедури встановлення компетентності експертів в детермінованих умовах та умовах невизначеності на основі аксіоми незміщеності [10]. При кількості експертів l , їх компетентностях $\mu_i \in (0, 1), i = \overline{1, l}, \sum_{i=1}^l \mu_i = 1$, визначених індивідуальних пріоритетах ЕО $\gamma'_{ki} \in (0, 1), \sum_{k=1}^{m_j} \gamma'_{ki} = 1 \forall i \in \{1, 2, \dots, l\}$ колективні пріоритети ЕО розраховуємо так:

$$\gamma_k^* = \frac{\sum_{i=1}^l \mu_i \gamma'_{ki}}{\sum_{k=1}^{m_j} \sum_{i=1}^l \mu_i \gamma'_{ki}}. \quad (4)$$

Можливий також варіант, коли експерт не може кількісно оцінити або пріоритети критеріїв, або пріоритети ЕО за кожним критерієм, але може впорядкувати ЕО. Тоді, якщо експерт один, задача зводиться до попередньої – достатньо взяти кращі елементи в класах. Якщо ж експертів багато і їх індивідуальні порядки розрізняються, то можна застосувати алгоритм визначення медіани Кука-Сейфорда для метрики неспівпадання рангів [4], та у випадку рівної компетентності експертів одержати колективний порядок. Якщо є експерти різнокомпетентні, то необхідним є застосування додаткових евристичних процедур.

Здійснимо об'єктивізацію процесів прийняття рішень експертами щодо пріоритетності комплектів АРТ. Припустимо, що є відомими дані про надзвичайні ситуації (НС) за таким форматом:

$$\langle ID, D, CN, TN, TE, PG, RG, MZ, RZ, NC, RGN, RZN \rangle,$$

де ID – ідентифікатор НС, D – дата, коли трапилась НС; CN – клас НС; TN – тип НС

(наприклад, пожежа в лісі, дорожньо-транспортна пригода, пожежа в будівлі, повінь тощо);

TE – використаний EO;

PG – кількість потенційних жертв (не використовувався жоден, або певний EO);

RG – кількість реальних жертв (деякі EO могли використовуватись);

MZ – обсяг потенційних збитків;

RZ – обсяг реальних збитків;

NC – необхідний EO (EO, який був потрібен для ліквідації НС, але його в наявності не було);

RGN – кількість реальних жертв, якщо б застосовувався необхідний EO ($RGN \leq RG \leq PG$);

RZN – обсяг збитків, якщо б застосовувався необхідний EO.

Зауважимо, що у випадку відсутності декількох EO, записи для кожного необхідного EO за вищенаведеним форматом вносяться в базу окремо. Розглянемо задачу визначення актуальності обладнання по відношенню до кількості людських жертв. Зауважимо, що кількість реальних жертв співпадає з кількістю потенційних жертв у випадку відсутності всіх потрібних EO. Кількість реальних жертв – це кількість потенційних жертв мінус кількість врятованих з використанням наявних EO.

Таким чином, кількість врятованих визначається такою залежністю:

$$PG - RG = f(EO_1, EO_2, \dots, EO_N), \quad (5)$$

де N – кількість наявних EO. Для кожної надзвичайної ситуації можна побудувати таблицю, що містить об'єктивно-суб'єктивні дані та має таку структуру (табл. 1).

Таблиця 1 – Статистичні дані щодо врятованих і не врятованих потерпілих під час НС

	Врятовано (PG – RG)			Не врятовано (RG)			
	Завдяки використанню елементів обладнання			Могли б врятувати, використовуючи елементи обладнання		Не могли врятувати у будь-якому випадку	
	EO ₁	EO ₂	EO _N	EO ₁	EO ₂	EO _N	
	a ₁₁	a ₁₂	a _{1N}	b ₁₁	b ₁₂	b _{1N}	c ₁
	a ₂₁	a ₂₂	a _{2N}	b ₂₁	b ₂₂	b _{2N}	c ₂
K	a _{K1}	a _{K2}	a _{KN}	b _{K1}	b _{K2}	b _{KN}	c _K
	A ₁	A ₂	A _N	B ₁	B ₂	B _N	C

За даними табл. 1 (S – сума додатних елементів стовпчика) можна знайти загальну кількість врятованих і загиблих, кількість людей, яких вдалось врятувати завдяки використанню певного EO, та кількість людей, яких можна було б врятувати завдяки певному EO, яке на момент НС було відсутнім.

Визначимо показники:

η_{11} – загальна кількість НС, у яких EO₁ застосовувався, оскільки це було потрібним;

η_{21} – загальна кількість НС, у яких EO₁ не застосовувався, оскільки не було необхідності, але він був у комплекті;

η_{31} – загальна кількість НС, у яких EO₁ не застосовувався, оскільки його не було у комплекті, але необхідність у його використанні була;

η_{41} – загальна кількість НС, у яких EO₁ не застосовувався, оскільки його не було у комплекті і не було необхідності у використанні.

У табл. 1.

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & j - \text{й EO не був потрібний,} \\ -1, & j - \text{й EO був відсутній,} \\ a, & a \in N, \end{cases}$$

$$b_{ij} = \begin{cases} 0, & j - \text{й EO не був потрібний,} \\ b, & b \in N. \end{cases}$$

Тоді

$$\begin{aligned} \eta_{11} &= \sum_{i=1}^K \chi\{a_{i1} \neq 0 \& a_{i1} \neq -1\}; \\ \eta_{21} &= \sum_{i=1}^K \chi\{a_{i1} = 0\}; \\ \eta_{31} &= \sum_{i=1}^K \chi\{a_{i1} = -1 \& b_{ij} \neq 0\}; \\ \eta_{41} &= \sum_{i=1}^K \chi\{b_{ij} = 0 \& a_{i1} = -1\}, l = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (6)$$

Визначимо коефіцієнт актуальності EO₁:

$$\lambda_l = \frac{\alpha}{N} (\eta_{11} + \eta_{31}) - \frac{\beta}{N} (\eta_{21} + \eta_{41}), l = \overline{1, N}. \quad (7)$$

Зауважимо, що

$$\lambda_l \in (-\beta, \alpha), l = \overline{1, N}.$$

Значення λ_{il} може бути і від'ємним, що вказує на неактуальність обладнання. Другий доданок у виразі (7) визначає функцію штрафу для EO₁ і опосередковано вказує на жертви (збитки) від того, що замість EO₁ в комплекті обладнання міг бути інший EO_l, потрібний для ліквідації наслідків даної НС. Встановлення значення коефіцієнтів α і β можливе експертним шляхом із урахуванням даних табл. 1.

Позначимо

$$Q = \sum_{j=1}^N a_{ij} \chi\{a_{ij} \neq -1\},$$

$$W = \sum_{j=1}^N b_{ij} \chi\{b_{ij} \neq a_{ij} \& b_{ij} > 0\}.$$

Тоді коефіцієнт актуальності комплекту АРТ для і-ої НС визначається так:

$$\eta_i = \frac{Q}{W + Q + c_i}, \forall i \in \overline{1, K}.$$

Значення коефіцієнта актуальності обладнання належить відрізу [0,1]. Випадок, коли $\eta_i = 0$, означає, що в результаті НС всі потенційні жертви стали реальними. Якщо ж $\eta_i = 1$, то всі потенційні жертви були врятовані. Загальний коефіцієнт актуальності -го комплекту АРТ для всіх аварій розраховується як середнє значення коефіцієнта актуальності комплекту АРТ для усіх НС.

Обговорення результатів

Вихідні дані для експериментальних розрахунків наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Вихідні статистичні дані щодо жертв під час НС

	Врятовано, осіб					Могли б врятувати, осіб					Z
	e1	e2	e3	e4	e5	e1	e2	e3	e4	e5	
1	0	2	-1	-1	1	0	2	0	1	1	2
2	5	0	0	-1	1	5	0	0	2	1	1
3	3	0	-1	2	1	3	0	1	2	1	1
4	-1	-1	0	1	2	2	3	0	1	2	1
5	1	-1	-1	0	1	1	1	3	0	1	3
S	9	2	0	3	6	11	6	4	6	6	8

Розрахуємо показники η_{ij} :

$$\begin{aligned} \eta_{11} &= 3, \eta_{12} = 1, \eta_{13} = 0, \eta_{14} = 2, \eta_{15} = 5; \\ \eta_{21} &= 1, \eta_{22} = 2, \eta_{23} = 2, \eta_{24} = 1, \eta_{25} = 0; \\ \eta_{31} &= 1, \eta_{32} = 2, \eta_{33} = 2, \eta_{34} = 2, \eta_{35} = 0; \\ \eta_{41} &= 0, \eta_{42} = 0, \eta_{43} = 1, \eta_{44} = 0, \eta_{45} = 0. \end{aligned}$$

Визначимо коефіцієнти актуальності елементів обладнання, припускаючи, що коефіцієнти $\alpha = \beta = 0,5$.

Одержимо:

$$\lambda_1 = 0,15; \lambda_2 = 0,1; \lambda_3 = -0,1; \lambda_4 = 0,1; \lambda_5 = 0,5$$

Одразу ж можна зробити висновок про найбільшу актуальність (максимально можливу) п'ятого елемента обладнання та низьку актуальність третього елемента. За актуальністю комплекти обладнання можна впорядкувати таким чином:

$$e3 < e2 = e4 < t1 < t5.$$

По відношенню до кожної НС розрахуємо коефіцієнти актуальності наявного комплекту АРО:

$$\eta_1 = 0,5, \eta_2 = 0,33, \eta_3 = 0,75, \eta_4 = 0,33, \eta_5 = 0,22.$$

Таким чином, аварійно-рятувальний підрозділ був найкраще забезпечений аварійно-рятувальною технікою, рятуючи людей при третій НС, найгірше – при п'ятій НС.

Висновки

При комплектуванні аварійно-рятувальної техніки традиційно враховувались внутрішні характеристики обладнання: ціна, надійність та потужність. Водночас, чи не найважливішим фактором є те, до яких позитивних наслідків привела її наявність при ліквідації надзвичайних ситуацій – зменшення кількості людських жертв чи обсягу матеріальних збитків. У статті запропоновано ввести критерій актуальності до множини інших критеріїв оптимальності аварійно-рятувального обладнання. Такий критерій дозволить надати пріоритету тому чи іншому складу обладнання. Його використання, як одного із критеріїв, є можливим із застосуванням відомих методів зведення багатокритеріальної задачі оптимізації до однокритеріальної, розв'язання її з використанням методів обчислювального інтелекту [12] та сприятиме об'єктивізації процесу прийняття рішень щодо комплектування аварійно-рятувальної техніки.

Список літератури

1. Крышталь В. Н., Снитюк В. Е. Проблема комплектования аварийно-спасательной техники и технологии ее решения. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2014. № 3. Т. 6. С. 35–40. doi: 10.15587/1729-4061.2014.33647.
2. Зайченко О. Ю., Зайченко Ю. П. *Дослідження операцій*. Київ: Видавничий дім «Слово», 2009. 472 с.
3. Нужнов Е. В., Барлит А. В. Трехмерная упаковка на основе эвристических процедур. *Известия ТРТУ*. № 3, 2002. С. 95–101.
4. Gallo G., Hammer P. L., Simeone B. Quadratic knapsack problems. *Mathematical Programming Studies*. Vol. 12, 2009. P. 132–149.
5. Лавров С. А. [и др.] *Математические методы исследования операций*. Суми: СДУ, 2017. 212 с.
6. Ларін О. М., Грицина І. М., Васильев С. В., Кривошей Б. І. *Пожезна та аварійно-рятувальна техніка: (Історія, сьогодення, майбутнє)*. Харків, 2005. 160 с.
7. Кодекс цивільного захисту України № 5403-VI від 2.10.2012 р. із змінами і доповненнями, внесеними законами України.
8. Волошин О. Ф., Гнатієнко Г. М., Кудін В. І. *Послідовний аналіз варіантів: Технології та застосування: Монографія*. Київ, 2013. 304 с.
9. Saaty T., Peniwati K. *Group Decision Making: Drawing out and Reconciling Differences*. Pittsburgh, 2008.

10. Снитюк В. Є., Гнатієнко Г. М. Оптимізація процесу оцінювання в умовах невизначеності на основі структуризації предметної області та аксіоми незміщеності. *Штучний інтелект*. 2008. № 3. С. 217–223.
11. Куваєва В. И., Болтенков В. А., Позняк А. В. Предварительная обработка экспертной информации при формировании агрегированной консенсусной ранговой оценки. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Т. 29 (68). Ч.1, Т 1, 2018. С. 155–162.
12. Згуровский М. З., Зайченко Ю. П. *Основы вычислительного интеллекта*. Київ, 2013. 407 с.
6. Larin O. M., Hrytsyna I. M., Vasyl'ev S. V., Kryvoshey B. I. *Pozhezha ta avariyno-ryatuvna tekhnika: (Istoriya, s'ohodennya, maybutnye)* [Fire and rescue equipment: (History, present, future)]. Kharkiv, 2005, 160 p.
7. Kodeks tsyvil'noho zakhystu Ukrainy no. 5403-VI of 2.10.2012 iz zminamy i dopovnennyamy, vnesenymy zakonamy Ukrainy [Code of Civil Protection of Ukraine No. 5403-VI of 2.10.2012, as amended by the laws of Ukraine]
8. Voloshyn O. F., Hnatiyenko H. M., Kudin V. I. *Posdilovnyy analiz variantiv: Tekhnolohiyi ta zastosuvannya: Monohrafiya* [Sequential analysis of options: Technologies and applications: Monograph]. Kyiv, 2013. 304 p.
9. Saaty T., Peniwati K. *Group Detsision Making: Drawing out and Retsonstiling Differentses*. Pittsburgh, 2008.
10. Snytyuk V. Ye., Hnatiyenko H. M. Optymizatsiya protsesu otsinyuvannya v umovakh nevyznachenosti na osnovi strukturyzatsiyi predmetnoyi oblasti ta aksiomy nezmyshchenosti [Optimization of the evaluation process in conditions of uncertainty based on the structuring of the subject area and the axiom of immutability]. *Shtuchnyy intelekt*, 2008, no. 3, pp. 217–223.

References (transliterated)

1. Kryshstal' V. N., Snytyuk V. E. Problema komplektovannya avariyno-spasatel'noy tekhniky u tekhnolohyy ee reshenyya [The problem of manning rescue equipment and technology for its solution]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkiv, 2014, no. 3, Vol. 6, pp. 35–40, doi: 10.15587/1729-4061.2014.33647.
2. Zaychenko O. Yu., Zaychenko Yu. P. *Doslidzhennya operatsiy* [Operations Research]. Kyiv, 2009, 472 p.
3. Nuzhnov E. V., Barlyt A. V. *Trekhmernaya upakovka na osnove evrystycheskykh protsedur* [Three-dimensional packaging based on heuristic procedures]. *Yzvestiya TRTU*, no. 3, 2002, pp. 95–101.
4. Gallo G., Hammer P. L., Simeone B. Quadratic knapsack problems. *Mathematical Programming Studies*, Vol. 12, 2009, pp. 132–149.
5. Lavrov Ye. A. [et al]. *Matematycheskiye metody yssledovannya operatsyy* [Mathematical Methods for Operations Research]. Sumy: SDU, 2017, 212 p.
11. Kuvaeva V. Y., Boltenev V. A., Poznyak A. V. Predvartel'naya obrabotka ekspertnoy ynformatsyy pry formirovaniy ahrehyrovannoy konsensusnoy ranhovoy otsenky [Pre-processing of expert information in the formation of an aggregated consensus rank assessment]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernads'koho. Seriya: tekhnichni nauky*. Vol. 29 (68), P.1, Vol. 1, 2018, pp. 155–162.
12. Zghurovskiy M. Z., Zaichenko Yu. P. *Osnovy vychyslytel'nogo intellekta* [Fundamentals of Computational Intelligence]. Kyiv, 2013. 407 p.

Відомості про авторів (About the Authors)

Кришталь Василь Миколайович – Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, старший викладач кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт; м. Черкаси, Україна; ORCID: 0000-0002-1430-7404; e-mail: kryshstal.v@ukr.net.

Vasyl Kryshstal – Senior Lecturer at the Department of Fire Tactics and Emergency Rescue, Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1430-7404; e-mail: kryshstal.v@ukr.net.

Снитюк Віталій Євгенович – доктор технічних наук, професор, декан факультету інформаційних технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, ORCID: 0000-0002-9954-8767; e-mail: snytyuk@gmail.com.

Vitaliy Snytyuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of Information Technologies Faculty, Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9954-8767; e-mail: snytyuk@gmail.com.

Федоренко Дмитро Сергійович – кандидат історичних наук, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, доцент кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт; м. Черкаси, Україна; ORCID : 0000-0002-2069-7760; e-mail: dsfedorenko@ukr.net

Dmytro Fedorenko – Candidate of Historical Sciences, associate Professor at the Department of Fire Tactics and Emergency Rescue, Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2069-7760; e-mail: dsfedorenko@ukr.net

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Кришталь В. М., Снитюк В. Є., Федоренко Д. С. Критерій актуальності обладнання при розв'язанні задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки в умовах невизначеності. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 70-76. doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.10.

Please cite this article as:

Kryshstal V., Snytyuk V., Fedorenko D. Criteria of actuality of equipment in solving of the problem of completing of emergency and rescue equipment in the conditions of uncertainty. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 70-76, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.10.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Крышталь В. Н., Снитюк В. Е., Федоренко Д. С. Критерий актуальности оборудования при решении задачи комплектования аварийно-спасательной техники в условиях неопределенности. *Вестник Национального технического университета «ХПИ».* Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 70-76. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.10.

АННОТАЦИЯ Выполнен анализ проблемы комплектования аварийно-спасательной техники, который показал такие ее особенности как существующую ограниченность финансовых ресурсов, значительный рост мощности элементной базы, принятие решений исключительно на основе опыта и интуиции ответственных лиц. Показано, что предлагаемые ранее решения базировались на учете стоимости оборудования, его надежности, функциональности и мощности, одновременно без внимания оставался аспект его применимости или актуальности. Учитывая значительное количество потенциальных элементов оборудования, которые могут входить в комплект, предложено ограничения, которые позволят сократить количество возможных вариантов на основе метода последовательного анализа вариантов. Предложено определять приоритетность элементов оборудования определенного класса с использованием метода анализа иерархий на основе установления приоритетности критериев и процедур определения компетентности экспертов. Поскольку задача комплектования является многокритериальной, то в качестве критерия определения оптимального комплекта предложено включить критерий актуальности. Построены модели показателей актуальности оборудования, а также определен коэффициент актуальности элемента оборудования и разработана модель для определения коэффициента актуальности комплекта аварийно-спасательного оборудования для определенной чрезвычайной ситуации. Предложено рассчитывать общий коэффициент актуальности комплекта оборудования для всех чрезвычайных ситуаций как усредненное значение коэффициента актуальности комплекта для каждой чрезвычайной ситуации при условии их равнозначности, или как взвешенное значение в противном случае. Проведенное численное моделирование на основе разработанного алгоритма позволило сделать выводы об актуальности и, как следствие, о приоритетности элементов оборудования, а также оценить степень обеспеченности аварийно-спасательного подразделения аварийно-спасательным оборудованием при различных чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации; аварийно-спасательное оборудование; комплектация; критерий актуальности

Надійшла (received) 29.03.2021

УДК 004.4:004.5:537.876

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.11

ДО ПИТАННЯ РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕЦІАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ З МАГНІТНОЮ СИСТЕМОЮ НА ОСНОВІ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ

О. С. КРЯЧОК^{1*}, М. О. РЕУЦЬКИЙ², Д. А. СУШКО¹

¹ Кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського», Київ, УКРАЇНА

² Кафедра електромеханіки, Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського», Київ, УКРАЇНА
*e-mail: alexandrkiachok@gmail.com

АНОТАЦІЯ Створення сучасних систем автоматизованого проектування приладів та електричних машин нових поколінь, що побудовані на базі постійних магнітів, обумовлює необхідність розробки нових математичних моделей та ефективних розрахункових алгоритмів. На основі математичних моделей та з використанням ІТ-технологій можна розробити як окремі функціональні блоки САПР, так і комплексну систему з розрахунку параметрів пристрою та моделювання його характеристик. У роботі розглянуто типову конструкцію електромеханічного пристрою з постійними магнітами, що створюють поле з заданими характеристиками у робочій зоні. На першому етапі дослідження не враховувалась неоднорідність оточуючого середовища. Для розрахунку напруженості магнітного поля, що створюється магнітами прямокутної форми, отримано дві математичні моделі. Такий підхід дозволив, по-перше, виконати перевірку отриманих результатів розрахунків і, по-друге, дозволив використати математичні моделі для порівняльного аналізу при виконанні чисельного моделювання характеристик магнітного поля системи, що побудована, наприклад, із використанням магнітів циліндричної форми. На базі розробленої математичної моделі запропоновано алгоритм аналізу вихідних характеристик спеціального пристрою з постійними магнітами. Пристрої даного типу можуть використовуватися для реєстрації малих зміщень. Одночасно сама схема магнітної системи та математичні моделі, що описують властивості магнітного поля можуть бути використані при розробці інших видів електротехнічних пристроїв, що побудовані з використанням постійних магнітів. У роботі проведено низку експериментів з чисельного моделювання картини магнітного поля у робочій зоні приладу. Також подано результати моделювання сигналу датчика при переміщенні пробного тіла.

Ключові слова: математична модель; алгоритм; магнітне поле; інформаційна технологія; розрахунок електромагнітного процесу; реєстрація малих переміщень

TO THE QUESTION OF THE CALCULATING OF THE SPECIAL DEVICES CHARACTERISTICS WITH A MAGNETIC SYSTEM BASED ON THE PERMANENT MAGNETS

A. KRIACHOK^{1*}, M. REUTSKYI², D. SUSHKO¹

¹ Department of Automation of Designing of Energy Processes and Systems, National Technical University "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

² Department of Electromechanics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The creation of modern computer-aided design systems for devices and electrical machines of new generation, built on the basis of permanent magnets, necessitates the development of new mathematical models and effective computational algorithms. Based on mathematical models and using IT technologies, it is possible to develop both separate functional CAD blocks and an integrated system for calculating device parameters and modeling its characteristics. The paper considers a typical design of an electromechanical device with permanent magnets, which create a field with specified characteristics in the working area. At the first stage of the study, the heterogeneity of the environment was not taken into account. To calculate the strength of the magnetic field created by rectangular magnets, two mathematical models were obtained. This approach made it possible, first, to check the results of calculations and, secondly, to use mathematical models for comparative analysis when performing numerical modeling of the magnetic field characteristics for a system built, for example, using cylindrical magnets. On the foundation of developed mathematical model, an algorithm for analyzing the initial characteristics of a special device with permanent magnets is proposed.

Devices of this type can be used to register small displacements. At the same time, the very scheme of the magnetic system and mathematical models describing the properties of the magnetic field can be used in the development of other types of electrical devices built using permanent magnets. A number of experiments on numerical simulation of the magnetic field pattern in the working area of the device were performed in the work. The results of the sensor signal simulation during the movement of the test body are also presented.

Keywords: mathematical model; algorithm; magnetic field; information technology; electromagnetic process computation; registration of the small displacements

Вступ

Для проектування та побудови сучасних електромеханічних пристроїв (наприклад,

надчутливих вимірювальних приладів) з наперед заданими робочими характеристиками необхідно на етапі конструкторського проектування максимально

точно розраховувати їх електромагнітні характеристики.

Разом із тим, у технічній літературі [1], зазвичай, недостатньо детально описані методики отримання математичних моделей та розрахункових алгоритмів, що застосовуються для розрахунку електромагнітних характеристик пристроїв на основі постійних магнітів. У поєднанні з технічними та технологічними обмеженнями це призводить до необхідності виготовлення певної кількості експериментальних зразків для отримання задовільного результату, що пов'язано зі значними матеріальними та економічними витратами.

Мета роботи

У статті розглядається приклад отримання математичної моделі для розрахунку магнітного поля у робочій зоні пристрою для вимірювання малих зміщень, який побудовано на основі висококоерцитивних магнітів. В умовах постійно зростаючого навантаження на всі компоненти екосистеми подібні вимірювальні системи дозволяють, наприклад, реєструвати мікросейсмічні коливання, що викликані впливом великих промислових підприємств, автомагістралей або зміщенням пластів Земної кори у результаті індустріальної діяльності людини.

Виклад основного матеріалу

На рис. 1 приведено принципову конструкцію магнітної системи пристрою, що побудована на основі трьох, включених назустріч один одному, постійних магнітів.

Екрануючий вплив інших елементів конструкції (наприклад, контейнера, у якому закріплена вся конструкція) на магнітне поле при побудові даної математичної моделі для розрахунку поля у робочій зоні не враховується.

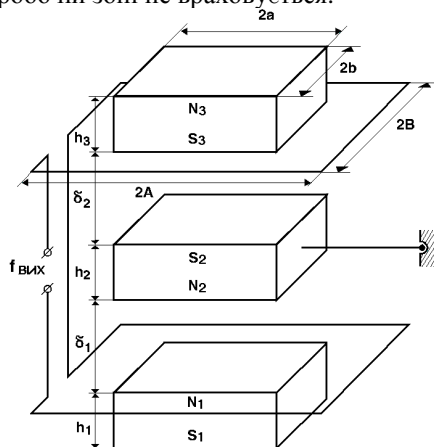


Рис. 1 – Принципова конструкція магнітної системи пристрою

Таким чином, у статті отримано та наведено математичні вирази напруженості магнітного поля у зазорах магнітного підвісу в однорідному та ізотропному середовищі і результати чисельного моделювання характеристик систем.

Метод розв'язання

Як відомо, загальною задачею розрахунку магнітного поля є визначення напруженості поля у заданих точках простору по заданих зарядах тіл. У випадку магнітостатичного поля задача вирішується знаходженням потенціалу як функції координат. Якщо відомо розподіл магнітних зарядів у кінцевій області однорідної та ізотропної середовищ, то рішення можливо знайти на основі методик, викладених у дослідженнях [2–5].

На основі представлених у [4, 5] математичних моделей рівняння, що описують поле постійних магнітів, можливо записати так:

$$\begin{cases} \text{rot}H'' = 0, & \text{div}(\mu H'') = \rho_m^0, \\ \text{rot}H' = i, & \text{div}(\mu H') = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де $\rho_m^0 = -\text{div}I_0$ – об'ємна густина магнітних зарядів.

Напруженість безвихрового поля постійних магнітів H'' володіє однозначним скалярним потенціалом φ :

$$H''(x,y,z) = -\text{grad} \varphi(x,y,z), \quad (2)$$

де скалярна функція $\varphi(x,y,z)$ при $\text{grad} \mu \neq 0$ повинна задовольняти диференційному рівнянню Пуассона:

$$\frac{d}{dx}(\mu d\varphi/dx) + \frac{d}{dy}(\mu d\varphi/dy) + \frac{d}{dz}(\mu d\varphi/dz) = \text{div}I_0, \quad (3)$$

а при $\text{grad} \mu = 0$ - рівнянню Лапласа:

$$d^2\varphi/dx^2 + d^2\varphi/dy^2 + d^2\varphi/dz^2 = 0. \quad (4)$$

Як відомо, окремим рішенням рівняння (3) є функція

$$\varphi(Q) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{V_M} \frac{\rho_m^0(M)}{R_{QM}} dV_M, \quad (5)$$

де $R_{QM} = \sqrt{(x-x_M)^2 + (y-y_M)^2 + (z-z_M)^2}$ – відстань від елемента об'ємом dV_M , оточуючого точку $M(x_M, y_M, z_M)$, у якій знаходиться заряд $\rho_m^0 dV_M$, до точки $Q(x, y, z)$, у якій обчислюється значення потенціалу φ .

Якщо припустити, що магніт рівномірно намагнічений (виконується для нових класів високоенергетичних магнітних матеріалів

виготовлених на основі сполучень рідкоземельних елементів з кобальтом та заліза з бором), тоді можна допустити, що всі магнітні заряди зосереджені на поверхні магніту. Такий магніт перетином S_M можна розглядати як сукупність двох рівних по величині магнітних зарядів $m_0 = I_0 S_M$ протилежного знаку, розподілених по основам магніту (полюсам магніту).

Таким чином, якщо заряди зосереджені всередині дуже тонкого шару, то, вважаючи $\rho_m^0 dV_M = \sigma_m^0 dS_M$, де dS_M – елемент поверхні шару, можна записати для потенціалу такого «поверхневого» розподілу заряду зі щільністю σ_m^0 наступний вираз:

$$\varphi(Q) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{S_M} \frac{\sigma_m^0(M)}{R_{QM}} dS_M. \quad (6)$$

Інтегральним рівнянням (6), по суті, формулюється задача розрахунку магнітного поля. Сумарне поле магнітної системи пристрою визначається на підставі принципу суперпозиції полів.

У випадку дослідження плоскопаралельного магнітного поля, що залежить лише від двох просторових координат, диференційне рівняння (3) у декартовій системі координат прийме наступний вигляд:

$$d/dx(\mu d\varphi/dx) + d/dz(\mu d\varphi/dz) = \text{div}I_0, \quad (7)$$

а рішенням (7), після перетворень [3], буде наступне рівняння:

$$\varphi(Q)_i = \frac{1}{2\pi\mu_0} \int_{x_M} \sigma_m^0(M)_i \ln \frac{1}{R_{QM}} dx_M. \quad (8)$$

Таким чином, після виконання інтегрування вираз для скалярного магнітного потенціалу магнітного шару остаточно буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi(Q)_i = & -\frac{\sigma_m^0(M)_i}{4\pi\mu_0} \left\{ (a-x) \ln[(a-x)^2 + z_i^2] \right. \\ & + (a+x) \ln[(a+x)^2 + z_i^2] - 4a \\ & \left. + 2z_i \left[\arctg \frac{a-x}{z_i} + \arctg \frac{a+x}{z_i} \right] \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

Складові напруженості плоскопаралельного магнітного поля можуть бути отримані із співвідношень:

$$H_x = -d\varphi/dx, \quad H_z = -d\varphi/dz, \quad H_y = 0. \quad (10)$$

Після виконання диференціювання та відомих математичних перетворень і спрощень для розрахунку значення складової H_x отримаємо наступне рівняння:

$$H(Q)_{x,i} = \frac{\sigma_m^0(M)_i}{4\pi\mu_0} \ln \frac{(x+a)^2 + z_i^2}{(x-a)^2 + z_i^2}. \quad (11)$$

Для розрахунку значення складової H_z , відповідно, отримаємо:

$$H(Q)_{z,i} = \frac{\sigma_m^0(M)_i}{2\pi\mu_0} \left[\arctg \frac{a-x}{z_i} + \arctg \frac{a+x}{z_i} \right]. \quad (12)$$

Потік, зчеплений з контуром, визначається як

$$\Phi = \int_{S_K} \mu_0 H_z dS_K. \quad (13)$$

Вертикальна складова сили, діючої на i -й магнітний шар зі сторони k -го магнітного шару, визначається як

$$F_{z,ki} = \sigma_{m,k}^0 \text{ шару} \int_{-a}^a H_{z,i} dx. \quad (14)$$

Виконавши інтегрування та математичні перетворення, отримаємо:

$$\begin{aligned} F_{z,ki} = & \frac{\sigma_{m,k}^0 * \sigma_{m,i}^0}{2\pi\mu_0} \left\{ 4a * \arctg \frac{2a}{z_{ki}} \right. \\ & \left. - z_{ki} * \ln \left[1 + \frac{4a^2}{z_{ki}^2} \right] \right\} * 2b \end{aligned} \quad (15)$$

Жорсткість магнітного підвісу по осі OZ визначається як

$$G_{z,ki} = \frac{dF_{z,ki}}{dz} = -\frac{\sigma_{m,k}^0 * \sigma_{m,i}^0}{2\pi\mu_0} \ln \left[1 + \frac{4a^2}{z_{ki}^2} \right] * 2b. \quad (16)$$

Рівняння (11, 12, 14–16) представляють математичну модель для розрахунку характеристик приладу, який побудовано на базі постійних магнітів.

З метою оцінки точності отриманих результатів чисельного моделювання доцільно виконати розрахунки за кількома математичними моделями.

Тому застосуємо наступний підхід - на основі теоретичних відомостей [4] напишемо вираз для розрахунку напруженості поля магнітного шару в заданих точках простору при відомому розподілі зарядів:

$$H(Q)_i = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{S_M} \sigma_m^0(M)_i \frac{R_{QM}}{R_{QM}^3} dS_M. \quad (17)$$

Виконав обчислення інтегралу та рутинні математичні перетворення [6, 7], отримаємо загальні аналітичні вирази для складових напруженості поля

H_x, H_z у проміжках магнітного підвісу. Приведемо ці рівняння у розгорнутому вигляді.

Для розрахунку складової H_x отримаємо:

$$H(Q)_{x,i} = \frac{\sigma_m^0(M)_i}{8\pi\mu_0} \cdot \left\{ \begin{aligned} & * \ln \left| \frac{(y+b) + \sqrt{(x-a)^2 + (y+b)^2 + z_i^2}}{(y+b) - \sqrt{(x-a)^2 + (y+b)^2 + z_i^2}} \right| \\ & - \ln \left| \frac{(y+b) + \sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2 + z_i^2}}{(y+b) - \sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2 + z_i^2}} \right| \\ & - \ln \left| \frac{(y-b) + \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z_i^2}}{(y-b) - \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z_i^2}} \right| \\ & + \ln \left| \frac{(y-b) + \sqrt{(x+a)^2 + (y-b)^2 + z_i^2}}{(y-b) - \sqrt{(x+a)^2 + (y-b)^2 + z_i^2}} \right| \end{aligned} \right\}. \quad (18)$$

Та, відповідно, для складової H_z маємо наступне рівняння:

$$H(Q)_{z,i} = \frac{\sigma_m^0(M)_i}{4\pi\mu_0} \cdot \left\{ \begin{aligned} & * \operatorname{arctg} \frac{(x+a) * (y+b)}{z_i * \sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2 + z_i^2}} \\ & - \operatorname{arctg} \frac{(x-a) * (y+b)}{z_i * \sqrt{(x-a)^2 + (y+b)^2 + z_i^2}} \\ & + \operatorname{arctg} \frac{(x-a) * (y-b)}{z_i * \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z_i^2}} \\ & - \operatorname{arctg} \frac{(x+a) * (y-b)}{z_i * \sqrt{(x+a)^2 + (y-b)^2 + z_i^2}} \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

Таким чином, для розробки розрахункового алгоритму доповнимо рівняння (11, 12, 14–16) математичними виразами (18, 19) та отримаємо математичну модель для дослідження характеристик приладу на базі постійних магнітів.

Результати чисельного моделювання

Отримані вирази стали основою для розробки програмного забезпечення [8–10] по розрахунку та дослідженню інтегральних характеристик магнітного підвісу. Алгоритм розрахунку [11–13] передбачає виконання наступних програмних блоків: формування даних, що характеризують електрофізичні та геометричні параметри конструкції; розрахунок координат вузлових точок, у яких необхідно обчислити значення компонент напруженості поля H_x, H_z ; розрахунок значень H_x, H_z ; визначення чутливості конструкції до малих зміщень; візуалізація отриманих результатів.

При проведенні чисельних розрахунків у якості базових використовувалися наступні вхідні дані: магнітна індукція – $B_{\text{зал}} = 1.10 \text{ Т}$; величина повітряного проміжку – $\delta_1 = \delta_2 = 1.0 * 10^{-3} \text{ м}$; довжина магнітів – $2a = 4.0 * 10^{-3} \text{ м}$; ширина магнітів – $2b = 2.0 * 10^{-3} \text{ м}$; висота магнітів – $h_1 = 1.0 * 10^{-3} \text{ м}, h_2 = 0.5 * 10^{-3} \text{ м}, h_3 = 1.0 * 10^{-3} \text{ м}$.

На рис. 2 наведено картину магнітного поля підвісу у площині XOZ ; ліва частина рисунки відображає результати розрахунків, що отримані з використанням математичної моделі (18, 19), а права частина - результати для моделі плоскопаралельного поля (11, 12).

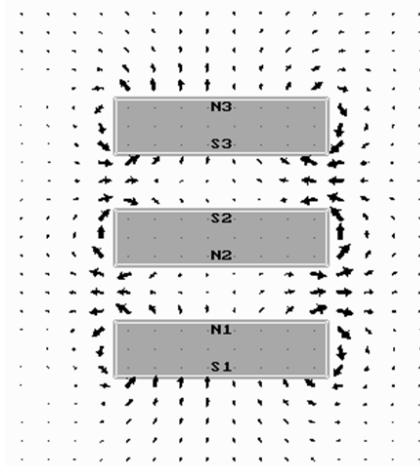


Рис. 2 – Картина магнітного поля у робочій зоні підвісу

На рис. 3 приведено результати моделювання сигналу датчика при переміщенні пробного тіла (графіки залежності $\Delta\Phi$ від прогину Δz) для заданих параметрів конструкції.

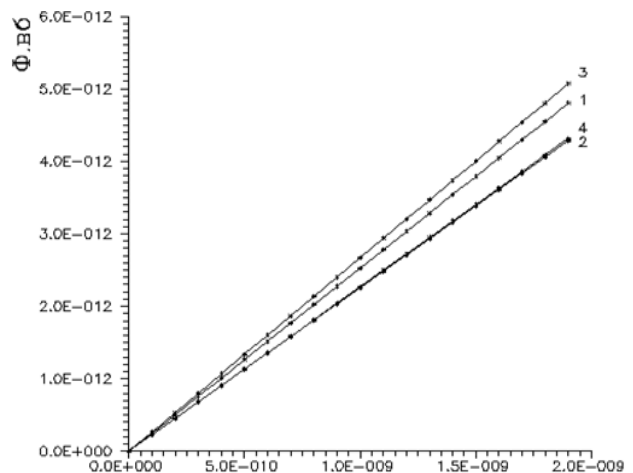


Рис. 3 – Графіки залежності $\Delta\Phi$ від прогину центрально магніту Δz

Аналіз даних чисельного моделювання показує, що алгоритм дає стійке рішення задачі та добре

узгоджується з результатами, що отримано з використанням іншої математичної моделі.

Висновки

Отримано математичні моделі, що дозволяють обчислити вихідні характеристики магнітного підвісу по заданим електрофізичним та геометричним параметрам конструкції. На їх основі проведено чисельне моделювання параметрів датчика при переміщенні пробного тіла. Отримані дані ефективної жорсткості досліджуваної системи, що дозволяють оцінити роздільну здатність пристрою та його динамічні характеристики.

Запропонований алгоритм аналізу може бути використаний і у інших задачах, коли необхідно розрахувати характеристики системи, що містить постійні магніти прямокутної форми, для створення більш досконалої конструкції.

Список літератури

1. Татевосян А. С., Андреева Е. Г., Чугулев А. О. *Расчет электрических и магнитных полей методом конечных элементов с применением комплекса программ ELCUT. Учебное пособие.* Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 84 с.
2. Smythe W. *Static and Dynamic Electricity.* Florida: CRC Press, 1989. 623 с.
3. Buchholz H. *Elektrische und magnetische Potentialfelder.* Берлін: Springer, 2012. 574 с.
4. Binns K. *Analysis and Computation of Electric and Magnetic Field Problems.* Oxford: Pergamon, 2013. 336 с.
5. Тамм И. Е. *Основы теории электричества: Учеб. пособие для вузов.* Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 616 с.
6. Angot A. *Compléments de mathématiques: à l'usage des ingénieurs de l'électrotechnique et des télécommunications.* Paris: Dunod, 1997. 868 с.
7. Двайт Г. Б. *Таблицы интегралов и другие математические формулы.* Москва: Наука, Гос. изд. физ-мат. лит., 1966. 228 с.
8. C language documentation. Microsoft. 2021. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/cpp/c-language/> (дата звернення: 03.12.2020).
9. Seacord R. *Effective C: An Introduction to Professional C Programming.* San Francisco: No Starch Press, 2020. 272 p.

10. Gustedt J. *Modern C.* New York: Manning Publications, 2019. 408 p.
11. Sedgewick R., Wayne K. *Algorithms.* Boston: Addison-Wesley Professional, 2011. 976 p.
12. Brass P. *Advanced Data Structures.* Cambridge University Press, 2019. 472 с.
13. Skiena S. *The Algorithm Design Manual.* New York: Springer, 2011. 730 p.

References (transliterated)

1. Tatevosjan A.S., Andreeva E.G., Chugulev A.O. *Raschet jelektricheskikh i magnitnykh polej metodom konechnykh jelementov s primeneniem kompleksa programm ELCUT. Uchebnoe posobie* [Calculation of electric and magnetic fields by the finite element method using the ELCUT software package. Tutorial]. Omsk, 2010, 84 p.
2. Smythe W. *Static and Dynamic Electricity.* Florida. CRC Press, 1989, 623 p.
3. Buchholz H. *Elektrische und magnetische Potentialfelder.* Berlin. Springer, 2012, 574 p.
4. Binns K. *Analysis and Computation of Electric and Magnetic Field Problems.* Oxford: Pergamon, 2013, 336 p.
5. Tamm I. E. *Osnovy teorii jelektrichestva: Ucheb. posobie dlja vuzov* [Fundamentals of the theory of electricity: Textbook. manual for universities]. Moscow. FIZMATLIT, 2003, 616 p.
6. Angot A. *Compléments de mathématiques: à l'usage des ingénieurs de l'électrotechnique et des télécommunications.* Paris. Dunod, 1997, 868 p.
7. Dvajt G.B. *Tablicy integralov i drugie matematicheskie formuly* [Integral tables and other mathematical formulas]. Moscow, 1966, 228 p.
8. C language documentation Microsoft. 2021: Available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/cpp/c-language/> (accessed 03.12.2020).
9. Seacord R. *Effective C: An Introduction to Professional C Programming.* San Francisco. No Starch Press, 2020, 272 p.
10. Gustedt J. *Modern C.* Shelter Island, New York. Manning Publications, 2019, 408 p.
11. Sedgewick R., Wayne K. *Algorithms.* Boston. Addison-Wesley Professional, 2011, 976 p.
12. Brass P. *Advanced Data Structures.* Cambridge. Cambridge University Press, 2019, 472 p.
13. Skiena S. *The Algorithm Design Manual.* New York City. Springer, 201, 730 p.

Відомості про авторів (About authors)

Крячок Олександр Степанович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів та систем; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-4829-635X; e-mail: alexandrkiachok@gmail.com.

Oleksandr Kriachok – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), associate professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", associate professor at the Department of Computer Aided Design Energy Processes and Systems, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4829-635X; e-mail: alexandrkiachok@gmail.com.

Реуцький Микола Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри електромеханіки; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-1870-2222; e-mail: rmo318@i.ua.

Mykola Reutskiy – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), associate professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", associate professor at the Department of Electromechanics, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1870-2222; e-mail: rmo318@i.ua.

Сушко Дмитро Анатолійович – студент, магістрант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», студент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів та систем; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-3065-4470; e-mail: dmytro.a.sushko@gmail.com.

Dmytro Sushko – student (masters), National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, student of Computer Aided Design Energy Processes and Systems Department, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3065-4470; e-mail: dmytro.a.sushko@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Крячок О. С., Реуцький М. О., Сушко Д. А. До питання розрахунку характеристик спеціальних пристроїв з магнітною системою на основі постійних магнітів. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 77-82. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.11.

Please cite this article as:

Kriachok O., Reutskiy M., Sushko D. To the question of the calculating of the special devices characteristics with a magnetic system based on the permanent magnets. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 77-82, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.11.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Крячок А. С., Реуцкий Н. А., Сушко Д. А. К вопросу расчета характеристик специальных устройств с магнитной системой на основе постоянных магнитов. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 77-82. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.11.

АННОТАЦИЯ Создание современных систем автоматизированного проектирования приборов и электрических машин новых поколений, построенных на базе постоянных магнитов, обуславливает необходимость разработки новых математических моделей и эффективных расчетных алгоритмов. На основе математических моделей и с использованием ИТ-технологий можно разработать как отдельные функциональные блоки САПР, так и комплексную систему для расчета параметров устройства и моделирования его характеристик. В работе рассмотрено типовую конструкцию электромеханического устройства с постоянными магнитами, которые создают поле с заданными характеристиками в рабочей зоне. На первом этапе исследования не учитывалась неоднородность окружающей среды. Для расчета напряженности магнитного поля, создаваемого магнитами прямоугольной формы, были получены две математические модели. Такой подход позволил, во-первых, выполнить проверку полученных результатов расчетов и, во-вторых, позволяет использовать математические модели для сравнительного анализа при выполнении численного моделирования характеристик магнитного поля системы, построенной, например, с использованием магнитов цилиндрической формы. На базе разработанной математической модели предложен алгоритм анализа выходных характеристик специального устройства с постоянными магнитами. Устройства данного типа могут использоваться для регистрации малых смещений. Одновременно сама схема магнитной системы и математические модели, описывающие свойства магнитного поля могут быть использованы при разработке других видов электротехнических устройств, построенных с использованием постоянных магнитов. В работе проведен ряд экспериментов по численному моделированию картины магнитного поля в рабочей зоне прибора. Также представлены результаты моделирования сигнала датчика при перемещении пробного тела.

Ключевые слова: математическая модель; алгоритм; магнитное поле; информационная технология; расчет электромагнитного процесса; регистрация малых перемещений

Надійшла (received) 28.04.2021

УДК 004.8:02

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.12

ПРОЕКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ БІБЛІОГРАФІЧНОЇ СИСТЕМИ

С. О. ЦИБУЛЬНИК*, Д. С. БІДНИК

кафедра приладів і систем орієнтації і навігації, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА
*e-mail: tsybulnik.s.a@gmail.com

АНОТАЦІЯ Розвиток інформаційних та комп'ютерних технологій призвів до необхідності еволюції концепції універсального бібліографічного контролю. Поява Інтернету та веб-технологій дозволила даній концепції вийти на новий рівень за рахунок створення ряду спільних міжнародних стандартів. Окрім цього, для забезпечення контролю та обміну бібліографічною інформацією були створені загальнодоступні бібліографічні та наукометричні бази даних. Сьогодні програмне забезпечення для управління бібліографічними записами користується попитом у різних країнах Європи та Америки. Розробка подібної автоматизованої бібліографічної системи та адаптація її функціоналу до стандартів та вимог у межах України є актуальною з ряду причин. Серед основних причин можна зазначити необхідність кожного науково-педагогічного співробітника закладів вищої освіти підтверджувати свої наукові досягнення при прийнятті на роботу, поданні наукової роботи на різноманітні конкурси, для отримання наукового звання або вченого ступеня, тощо. Бурхливий розвиток інформаційних та комп'ютерних технологій дозволяє сьогодні відмовитися від ведення переліку наукових праць в ручному режимі та перейти до використання спеціалізованого програмного забезпечення на смартфонах. Саме тому спроектовано архітектуру автоматизованої бібліографічної системи, яка розроблена у вигляді мобільного додатку на базі операційної системи Android. Показано, що більше третини населення планети має мобільний телефон і найбільш популярною мобільною операційною системою є Android. Мовою програмування, на якій буде написано програмне забезпечення, обрано Java, оскільки переважна більшість операційної системи Android написана на цій мові. Для обраної операційної системи визначено ряд технологій, які дозволять спростити процес розробки мобільного додатку. На базі багаторівневої моделі архітектури та шаблону MVVM спроектовано тришарову архітектуру автоматизованої бібліографічної системи. Дана архітектура дозволяє забезпечити основні нефункціональні характеристики якості розроблюваного програмного забезпечення, а також ефективно реалізувати правила бізнес-логіки в межах об'єктно-орієнтованої парадигми програмування.

Ключові слова: програмне забезпечення; Android; MVVM; програмна архітектура; бібліографічна база даних; Java

DESIGN OF THE ARCHITECTURE OF AN AUTOMATED BIBLIOGRAPHIC SYSTEM

S. TSYBULNYK, D. BIDNYK

Department of Orientation and Navigation Instruments and Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The development of information and computer technologies has led to the need to evolve the concept of universal bibliographic control. The creation of the Internet and web technologies has allowed this concept to reach a new level by creating a number of common international standards. In addition, to ensure control and exchange of bibliographic information public bibliographic and scientometric databases were created. Today, software for managing bibliographic records is in demand in various countries in Europe and America. The most popular software in these countries is EndNote, RefWorks, BibTeX and Zotero. The development of such automated bibliographic system and the adaptation of its functionality to standards and requirements within Ukraine is relevant for a number of reasons. The main reasons are the need for every scientist and lecturer of higher education institutions to confirm their scientific achievements when hiring, submitting scientific work to various competitions, to obtain a scientific degree and so on. Today the rapid development of information and computer technology allows us to abandon the list of scientific papers in manual mode and move to the use of specialized software on smartphones. That is why the architecture of an automated bibliographic system, which is developed as a mobile application based on the Android operating system, was designed. Java is chosen as the programming language in which the software will be written, as the vast majority of the Android operating system is written in this language. A number of technologies were chosen for the selected operating system. They will simplify the process of developing a mobile application. The three-layer architecture of the automated bibliographic system is designed on the basis of the multilevel model of architecture and the MVVM template. This architecture allows to provide the main non-functional characteristics of the quality of the developed software, as well as to effectively implement the rules of business logic within the object-oriented programming paradigm.

Keywords: Software; Android; MVVM; software architecture; bibliographic database; Java

Вступ

У 1960-х роках відбулося зародження концепції універсального бібліографічного контролю [1]. Дана концепція була заснована на міжнародно узгоджених принципах каталогізації, що характеризувалася

новими технологічними вимогами до бібліотечного співтовариства. Метою концепції універсального бібліографічного контролю [1] стало просування всевітньої системи контролю та обміну бібліографічною інформацією, що має бути загальнодоступною в уніфікованій міжнародно

прийнятій формі та містити основні бібліографічні дані про всі видання у всіх країнах.

Бібліотеки в 1990-х роках були змушені переглянути свої стандарти та практики щодо організації бібліографічної інформації. З одного боку вони мали використовувати прийняті на міжнародному рівні стандарти у повсякденній практиці, а з іншого – враховувати розвиток інформаційних технологій та ввести опис нових форм матеріалів – електронних ресурсів (цифрових або оцифрованих) і, згодом, веб-документів – до своїх бібліотечних каталогів, щоб задовольнити потреби користувачів [1]. З того часу було недостатньо розглядати бібліотечний фонд (об'єкти бібліографічного опису) зі статичної точки зору, стало необхідним описати його в контексті життєвого циклу. Міжнародні комунікаційні технології загалом, а також Інтернет та веб-технології зокрема, почали відігравати вирішальну роль [1] на тлі цієї вимоги. Це також викликало необхідність для бібліотек більш ефективно взаємодіяти зі своїм середовищем – видавцями та користувачами. Тому для ефективного просування концепції універсального бібліографічного контролю бібліотеки все частіше використовують прогресивні комп'ютерні технології для формування бібліографічних та наукометричних баз даних.

Використання програмного забезпечення для управління бібліографічними записами, такого як EndNote, RefWorks, BibTeX та Zotero, сьогодні широко зарекомендувало себе серед дослідників та студентів, як інструмент економії часу для написання навчальних робіт. Як наочний приклад, дванадцять з двадцяти п'яти університетів США та чотири з п'ятнадцяти канадських університетів надають своїм клієнтам ліцензії на сайт EndNote, як стандартну частину своїх послуг, а вісім веб-сайтів бібліотек цих університетів пропонують EndNote для придбання, підтримуючи інші програми управління бібліографічними даними. Цей широко розповсюджений доступ у відомих великих академічних закладах характеризує ефективність програмного забезпечення, як інструменту управління бібліографією [2].

У травні 2011 р. з метою вимірювання використання програмного забезпечення для управління посиланнями в академічному середовищі в Талліннському університеті (Естонія) було проведено онлайн-опитування [3] студентів та викладачів. Пізніше подібне опитування [4] було також проведено в одному із найбільших закладів вищої освіти Італії – Торінському університеті. Обидва дослідження показали низьку обізнаність студентів та викладачів щодо функціональних можливостей подібного програмного забезпечення та низьку активність бібліотек у проведенні навчання.

Від моменту зародження концепції універсального бібліографічного контролю та до сьогоднішнього дня завдяки розвитку комп'ютерних

технологій було багато спроб створити програмне забезпечення управління бібліографічними записами [5–8]. Усі вони мали свої переваги та недоліки, але не всі з них пройшли перевірку часом і використовуються сьогодні.

У реаліях закладів вищої освіти України кожен науково-педагогічний співробітник постійно стикається з необхідністю формування та коректного оформлення списку своїх наукових робіт у відповідності до певного стандарту. Серед основних джерел, пов'язаних із необхідністю формування бібліографічного списку наукових праць, можна назвати наступні: конкурс на заміщення посади, захист докторської дисертації або дисертації кандидата наук, різноманітні конкурси, зокрема державні, отримання наукового звання, щорічні звіти структурних підрозділів з науки, тощо.

На сьогоднішній день більшість науково-педагогічних співробітників для формування та ведення списку наукових праць використовує можливість програмних засобів Word та Excel. Проте ці програмні засоби мають ряд недоліків, які призводять до збільшення витрат часу на створення та пошук записів, відслідковування записів-дублів, сортування, підведення статистики. Враховуючи ці недоліки, пропонується створення автоматизованої бібліографічної системи, яка спростить процес роботи (створення, редагування, пошук, сортування, статистика, видалення, тощо) з бібліографічним списком наукових праць у межах структурного підрозділу закладу вищої освіти.

Мета роботи

Метою роботи є проектування архітектури автоматизованої бібліографічної системи, що розробляється у вигляді мобільного додатку на базі операційної системи Android.

Середовище розробки автоматизованої системи

В останні десятиліття у всьому світі спостерігається бурхливий розвиток інформаційних технологій. Завдяки цьому в магазинах з'явилося багато нових пристроїв таких, як планшети, смартфони, ноутбуки та інші. Сьогодні більшість людей не уявляє свого життя без них.

Практично кожен існуючий гаджет має операційну систему, яка дозволяє йому виконувати своє функціональне призначення. Лідером серед операційних систем (платформ) подібних приладів на сьогоднішній день є Android від компанії Google (рис. 1). Ця система використовується на самих різних пристроях, а саме: смартфонах, планшетах, телевізорах, смарт-годинниках та інших гаджетах і навіть автомобілях. Відповідно до [9] за останній рік операційною системою Android користуються близько 72% власників смартфонів, а загальна кількість користувачів смартфонів на операційній системі Android оцінюється в більш ніж 2,5 млрд. людей по всьому світу [10].

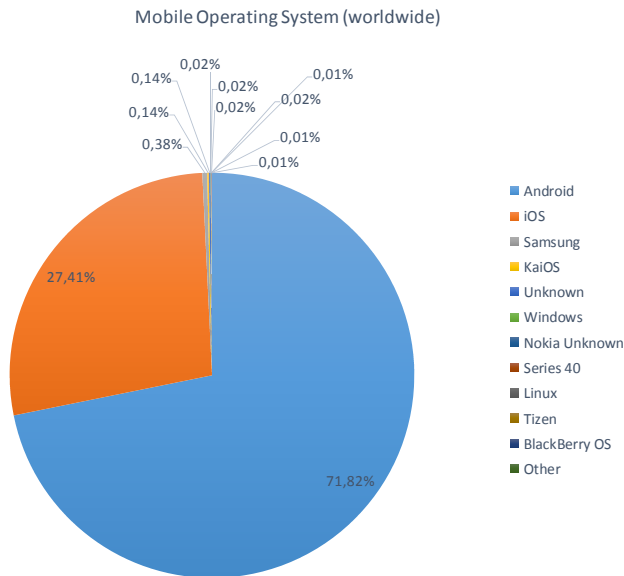


Рис. 1 – Діаграма розподілу користувачів за операційними системами мобільних телефонів

Програмне забезпечення на базі операційної системи Android розробляється за допомогою різних мов програмування та відповідних технологій. Найбільш поширена та використовувана мова серед усіх – Java, оскільки переважна більшість операційної системи Android написана на цій мові. Саме тому розробка програмного забезпечення (додатків) для платформи Android ведеться переважно на мові Java.

Для створення програм на мові Java необхідне спеціальне програмне забезпечення. До спеціального програмного забезпечення відносяться такі інструменти, як JRE (Java Runtime Environment) і JDK (Java Development Kit) [11]. JRE – являє собою набір програмних інструментів для розробки додатків Java. Він об'єднує віртуальну машину Java, основні класи платформи і підтримуючі бібліотеки. JRE є частиною Java Development Kit (JDK), але може бути завантажений окремо. JDK – це цілий набір інструментів, комплект розробника додатків на мові Java, до якого входять стандартні бібліотеки класів Java, компілятор javac, документація, приклади коду і різноманітні службові утиліти. Проте в JDK не входить інтегроване середовище розробки, його необхідно інстальувати окремо.

Для роботи з операційною системою Android існує багато інтегрованих середовищ розробки, але найбільш популярним та зручним є Android Studio, яке створене спеціально для розробки під операційну систему Android. Android Studio [12] – універсальне середовище розробки, яке дозволяє оптимізувати роботу додатків не тільки на смартфонах, але і на інших пристроях, які працюють на основі даної операційної системи. Головною особливістю цього середовища є те, що в ньому вже є вбудований емулятор, який дозволяє перевірити коректну роботу програми на пристроях з різним співвідношенням сторін робочого екрану.

Для збереження структурованих даних зазвичай використовують бази даних. Існують різні системи керування базами даних (СКБД), наприклад, Oracle, SQLite, MySQL та інші. Для створення автоматизованої системи було обрано базу даних SQLite, тому що операційна система Android вже має вбудований інструментарій для керування цією базою.

SQLite [13] – це автономна реляційна база даних без сервера SQL, вона популярна і проста в освоєнні та займає декілька мегабайт в порівнянні з іншими. SQLite підтримує типи даних TEXT (аналог String в Java), INTEGER (аналог long в Java) та REAL (аналог double в Java). Решта типів даних слід конвертувати, перш ніж зберігати в базі даних. Програмне забезпечення SQLite являє собою бібліотеку, з якої компонується програма. Таким чином база даних стає складовою частиною програми. Уся база даних зберігається в єдиному стандартному файлі на пристрої, на якому виконується програма.

Для того щоб можна було запустити розроблений додаток автоматизованої системи на іншому пристрої, який не містить відповідного середовища розробки, необхідно використати одну з існуючих систем збірки. Система автоматизованої збірки [14] – це програмне забезпечення, що забезпечує автоматизацію збірки проекту. Така система дозволяє завантажити бібліотеки до проекту з мережі Інтернет, скомпілювати класи всього проекту, згенерувати допоміжні файли (наприклад, SQL-скрипти, XML-конфіги) та займатися упакуванням скомпільованих класів проекту в архіви різних форматів: zip, rar, grm, jar та інші. Подібні системи часто також дозволяють генерувати програмну документацію та різні звіти.

Для розробки Android додатку зазвичай застосовують автоматичну систему збірки Gradle [15–17], крім того ця система вже встановлена в середовищі розробки Android Studio. Gradle в якості переваг має відкритий вихідний код, є універсальною та може використовувати різні плагіни.

Враховуючи усі вищезазначені переваги, для розробки автоматизованої бібліографічної системи у вигляді мобільного додатку на базі операційної системи Android було обрано середовище розробки Android Studio та СКБД SQLite.

Проектування архітектури

Область комп'ютерних наук з моменту свого утворення зіткнулася з проблемами, пов'язаними зі складністю програмних систем. Раніше подібні проблеми вирішувалися розробниками шляхом правильного вибору структур даних, розробки алгоритмів і застосування концепції розмежування повноважень. Основною ідеєю створення архітектури програмного забезпечення є ідея зниження складності системи завдяки введенню абстракцій та розмежування повноважень. Під програмною

архітектурою розуміється [18] структура компонентів, їх взаємозв'язки, принципи і напрямки розвитку, що визначають їх розробку і еволюцію.

Архітектурним проектуванням системи називається перший етап процесу проектування, на якому розробляється базова структура системи, тобто визначаються основні компоненти (підсистеми), а також їх структура, елементи керування і шляхи взаємодії між собою. Модель системної архітектури часто є відправною точкою для створення специфікації для різних частин програмного забезпечення чи системи [19].

Підсистема – це окрема система, функції (методи) якої не залежать від сервісів, що надаються іншими підсистемами. Підсистеми складаються з модулів і мають певні інтерфейси, за допомогою яких взаємодіють з іншими підсистемами [19].

Модуль – це зазвичай компонент підсистеми, який надає один або декілька сервісів для інших модулів. Модуль може використовувати сервіси, які підтримуються іншими модулями. Як правило, модуль не розглядається як незалежна система. Модулі зазвичай складаються з ряду інших, більш простих компонентів [19].

Для надання автоматизованій системі, яка проектується, певних атрибутів якості часто застосовуються різні архітектурні шаблони. Кожен шаблон має свої завдання, переваги і недоліки.

Для реалізації автоматизованої бібліографічної системи було обрано архітектурний шаблон MVVM. Шаблон MVVM (Model-View-ViewModel) є однією з можливих реалізацій моделі абстрактної машини [19,20] (іноді також називається багаторівневою або шаруватою моделлю архітектури). MVVM (рис. 2) дозволяє відокремити логіку додатку від візуальної частини та складається з трьох компонентів: моделі (Model), моделі подання (ViewModel) і уявлення (View).

Model – модель описує використовувані в додатку дані, їх перетворення та збереження. Моделі можуть містити логіку, безпосередньо пов'язану цими даними, наприклад, логіку валідації властивостей моделі. У той же час модель не повинна містити ніякої логіки, пов'язаної з відображенням даних і взаємодією з візуальними елементами керування (наприклад, графічним інтерфейсом користувача).

View – визначає візуальний інтерфейс, через який користувач взаємодіє з додатком (наприклад, код в html, який реалізує графічний інтерфейс у вигляді кнопок, текстових полів та інших візуальних елементів).

ViewModel – пов'язує Model і View за допомогою механізму прив'язки даних. Якщо в моделі змінюються значення властивостей, при реалізації інтерфейсу автоматично йде зміна відображуваних даних, хоча Model і View не мають безпосереднього зв'язку між собою. ViewModel також містить логіку по отриманню даних з моделі, які потім передаються на рівень вище у View. Також ViewModel визначає логіку по оновленню даних в моделі.

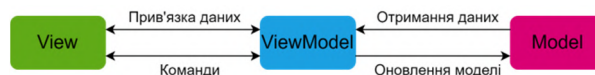


Рис. 2 – Шаблон MVVM

На основі шаблону MVVM побудовано архітектуру мобільного додатку автоматизованої бібліографічної системи (рис. 3).

На рис. 3 можна побачити що View утворює зв'язок лише з ViewModel, а ViewModel – лише з Model. Завдяки обраному шаблону MVVM вдалося відділити логіку роботи з даними від логіки їх відображення. У даному випадку кожен рівень відповідає за свою конкретну функцію та поєднаний функціональними зв'язками лише з сусіднім рівнем, що відповідає визначенню багаторівневої архітектури. Таким чином додаток на базі операційної системи Android можна буде легко підтримувати у подальшому.

Елемент «Графічний інтерфейс користувача», який знаходиться у блоці View відповідає за відображення усіх візуальних компонентів мобільного додатку. Він містить графічні компоненти інтерфейсу, що дозволяють вводити та відображати первні дані. Цей рівень має зв'язок з сусіднім рівнем ViewModel через модуль «Інтерфейс вибору користувача».

Даний інтерфейс виконує декілька основних функцій: 1) формує запит на перевірку наявності користувачів у базі даних й передає його в «Підсистему прийняття рішень»; 2) залежно від вибору на початковому екрані додатку, виконує перехід до модулів «Існуючий користувач» або «Новий користувач».

Модуль «Новий користувач» дозволяє записати ключові дані нового користувача: ID, логін та пароль, прізвище, ім'я та по-батькові, а також інші, визначені в технічному завданні. Після чого ця інформація передається в підсистему «Введення даних», де перевіряється на коректність. Результат перевірки направляється у «Підсистему прийняття рішень».

Модуль «Існуючий користувач» дозволяє отримати доступ до трьох підсистем: «Введення даних», «Редагування даних», «Видалення даних». Відповідно до назв, дані підсистеми мають змогу створювати нові дані (бібліографічні записи), редагувати чи видаляти існуючі (бібліографічні записи, профіль поточного користувача). Також через підсистему «Введення даних» визначається інформація для пошуку та сортування. Результати роботи зазначених вище підсистем передаються в «Підсистему прийняття рішень».

На основі отриманих даних «Підсистема прийняття рішень» може виконувати наступні функції: 1) передавати дані для їх подальшого запису (редагування чи видалення) у базу даних; 2) передавати інформацію щодо запитів (наявність користувача в базі даних, пошук, сортування) у модуль «Інтерфейс формування запитів»; 3) передавати повідомлення в підсистему «Виведення даних» щодо некоректного вводу даних.

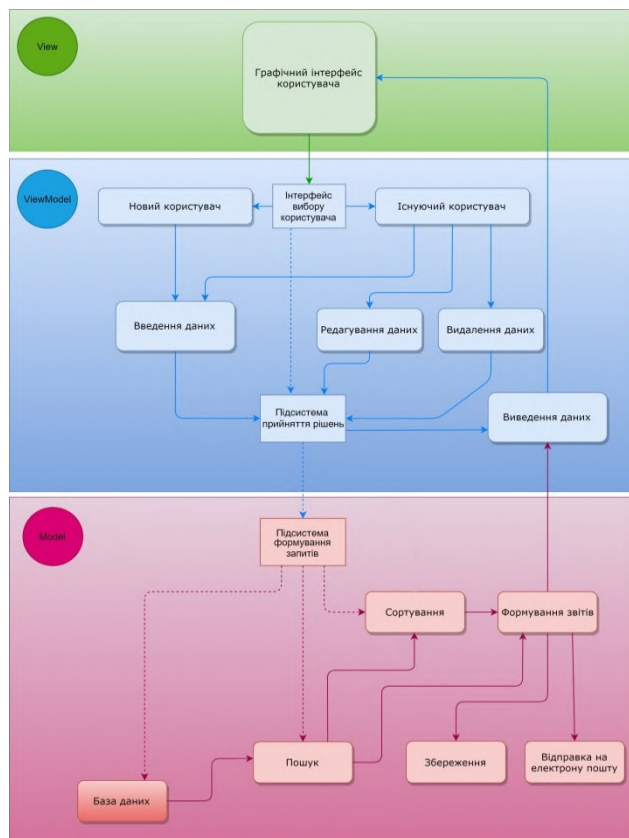


Рис. 3 – Архітектура мобільного додатку

Підсистема «Виведення даних» відповідає за перетворення отриманих даних (звіти з підсистеми «Формування звітів», повідомлення про помилки з «Підсистеми прийняття рішень», тощо) для їх адекватного відображення у графічному інтерфейсі користувача.

Загалом архітектурний рівень ViewModel реалізує бізнес-логіку розроблюваного додатку. Програмна ж логіка (алгоритми пошуку, сортування, збереження, тощо) знаходиться на рівні Model.

«Підсистема прийняття рішень» передає матрицю з даними в «Підсистему формування запитів», яка знаходиться на сусідньому рівні Model. Ця підсистема виконує наступні функції: 1) визначає який саме набір даних отримано; 2) розподіляє отримані дані за відповідними категоріями (запис, редагування, видалення з бази, ключові слова пошуку, умови сортування, тощо); 3) направляє запит на зчитування даних з «Бази даних»; 4) направляє умови пошуку та сортування у підсистему обробки даних, яка представлена двома модулями, а саме: «Пошук» та «Сортування».

Після запиту з «Бази даних» інформація у вигляді матриці передається в підсистему обробки даних, де проходить пошук і сортування отриманої інформації. Далі відсортована інформація потрапляє у модуль «Формування звітів», де за відповідними правилами формується матриця з даними для відображення. Ця інформація далі передається у трьох напрямках: у модулі «Збереження» та «Відправка на електронну пошту», а також у підсистему «Виведення даних».

Підсистема «Виведення даних» призначена для перетворення отриманої інформації у відповідні повідомлення для відображення. Серед повідомлень можуть бути наступні: помилки введення, редагування, видалення чи пошуку, результати пошуку та сортування, персональні дані користувача, тощо. Результати роботи даної підсистеми передаються на більш високий архітектурний рівень View, де виводяться у відповідних елементах графічного інтерфейсу користувача.

Використовуючи описану архітектуру мобільного додатку на базі операційної системи Android, можна оптимізувати процес розробки та значно зменшити час на розробку. Також розташування елементів в окремих підсистемах дозволяє зменшити ймовірність виникнення помилок, оскільки працездатність кожної підсистеми можна протестувати незалежно від інших підсистем.

Висновки

У роботі було показано, що розробка автоматизованої бібліографічної системи є актуальною з ряду причин, серед яких можна зазначити необхідність кожного викладача закладів вищої освіти підтверджувати свої наукові досягнення при прийнятті на роботу, поданні наукової роботи на різноманітні конкурси, для отримання наукового звання або вченого ступеня, тощо.

Бурхливий розвиток інформаційних та комп'ютерних технологій дозволяє сьогодні відмовитися від ведення переліку наукових праць в ручному режимі та перейти до використання спеціалізованого програмного забезпечення на смартфонах. Показано, що більше третини населення планети має мобільний телефон і найбільш популярною мобільною операційною системою є Android.

Для обраної операційної системи визначено ряд технологій, що дозволять спростити процес розробки мобільного додатку.

На базі багаторівневої моделі архітектури та шаблону MVVM спроектовано тришарову архітектуру автоматизованої системи.

У подальшій роботі розроблена архітектура у поєднанні з обраними технологіями дозволить реалізувати якісний та надійний мобільний додаток автоматизованої бібліографічної системи.

Список літератури

1. Willer M., Dunsire G. *Bibliographic Information Organization in the Semantic Web*. Chandos Publishing. 2013. 318 p. doi: 10.1016/B978-1-84334-731-6.50001-6.
2. Fitzgibbons M., Meert D. Are Bibliographic Management Software Search Interfaces Reliable?: A Comparison between Search Results Obtained Using Database Interfaces and the EndNote Online Search Function. *The Journal of Academic Librarianship*. 2010. Vol. 36. Issue 2. P. 144–150. doi: 10.1016/j.acalib.2010.01.005.
3. Francese E. The Usage of Reference Management Software (RMS) in an Academic Environment: A Survey at Tallinn University. *International Conference on Integrated*

- Information 29th September to 3rd October 2011*. Kos, Greece, 2011. P. 293–296.
4. Francese E. Usage of Reference Management Software at the University of Torino. *Journal of Library and Information Science*. 2013. Vol. 4. № 2. P. 145–174. doi: 10.4403/jlis.it-8679.
 5. Wipke W. T. REFFORM: An automatic reference and bibliography formatting system. *Tetrahedron Computer Methodology*. 1988. Vol. 1. Iss. 1. P. 87–92. doi: 10.1016/0898-5529(88)90011-5.
 6. Johnson S. B., Bales M. E., Dine D., [et al.] Automatic generation of investigator bibliographies for institutional research networking systems. *Journal of Biomedical Informatics*. 2014. Vol. 51. P. 8–14. doi: 10.1016/j.jbi.2014.03.013.
 7. Zhu Y., Yan E., Song I.-Y. A natural language interface to a graph-based bibliographic information retrieval system. *Data & Knowledge Engineering*. 2017. Vol. 111. P. 73–89. doi: 10.1016/j.datak.2017.06.006.
 8. Helman W. P., Ross A. B. Radiation chemistry data center: Information services produced from the bibliographic data base. *Radiation Physics and Chemistry*. 1980. Vol. 16. Iss. 6. P. 425–430. doi: 10.1016/0146-5724(80)90186-7.
 9. Mobile Operating System Market Share Worldwide. URL: <https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/worldwide> (дата звернення: 26.04.2021).
 10. Android. URL: <https://developer.android.com/about> (дата звернення: 26.04.2021).
 11. Oracle Java. URL: <https://www.oracle.com/java/> (дата звернення: 26.04.2021).
 12. Android Studio. URL: <https://developer.android.com/studio> (дата звернення: 26.04.2021).
 13. What Is SQLite? URL: <https://www.sqlite.org/index.html> (дата звернення: 26.04.2021).
 14. Top 10 Best Build Automation Tools Speed Up Deployment Process. URL: <https://uk.myservername.com/top-10-best-build-automation-tools-speed-up-deployment-process> (дата звернення: 26.04.2021).
 15. Accelerate developer productivity. URL: <https://gradle.org/> (дата звернення: 26.04.2021).
 16. Muschko B. *Gradle in Action*. Manning Publications. 2014, 480 p.
 17. Dabir K., Abhinandan *Gradle Essentials: Master the fundamentals of Gradle using real-world projects with this quick and easy-to-read guide* (Community Experience Distilled). Packt Publishing, 2015. 176 p.
 18. Обзор терминологии SOA: Часть 1. Сервис, архитектура, управление и бизнес-термины. URL: <https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/ws-soa-term1/?lnk=hm> (дата звернення: 26.04.2021).
 19. Гудов А. М., Завозкин С. Ю., Трофимов С. Н. *Технология разработки программного обеспечения: Учебное пособие*. Кемерово. 2009. 138 с.
 20. Паттерн MVVM. Определение паттерна MVVM. URL: <https://metanit.com/sharp/wpf/22.1.php> (дата звернення: 26.04.2021).
 - Academic Librarianship, 2010, Vol. 36, Iss. 2, pp. 144–150, doi: 10.1016/j.acalib.2010.01.005.
 3. Francese E. The Usage of Reference Management Software (RMS) in an Academic Environment: A Survey at Tallinn University. *International Conference on Integrated Information 29th September to 3rd October 2011*, Kos, Greece, 2011, pp. 293–296.
 4. Francese E. Usage of Reference Management Software at the University of Torino. *Journal of Library and Information Science*, 2013, Vol. 4, no. 2, pp. 145–174, doi: 10.4403/jlis.it-8679.
 5. Wipke W. T. REFFORM: An automatic reference and bibliography formatting system. *Tetrahedron Computer Methodology*, 1988, Vol. 1, Iss. 1, pp. 87–92, doi: 10.1016/0898-5529(88)90011-5.
 6. Johnson S. B., Bales M. E., Dine D., [et al.] Automatic generation of investigator bibliographies for institutional research networking systems. *Journal of Biomedical Informatics*, 2014, Vol. 51, pp. 8–14, doi: 10.1016/j.jbi.2014.03.013.
 7. Zhu Y., Yan E., Song I.-Y. A natural language interface to a graph-based bibliographic information retrieval system. *Data & Knowledge Engineering*, 2017, Vol. 111, pp. 73–89, doi: 10.1016/j.datak.2017.06.006.
 8. Helman W. P., Ross A. B. Radiation chemistry data center: Information services produced from the bibliographic data base. *Radiation Physics and Chemistry*, 1980, Vol. 16, Iss. 6, pp. 425–430, doi: 10.1016/0146-5724(80)90186-7.
 9. Mobile Operating System Market Share Worldwide. Available at: <https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/worldwide> (accessed: 26.04.2021).
 10. Android. Available at: <https://developer.android.com/about> (accessed: 26.04.2021).
 11. Oracle Java. Available at: <https://www.oracle.com/java/> (accessed: 26.04.2021).
 12. Android Studio. Available at: <https://developer.android.com/studio> (accessed: 26.04.2021).
 13. What Is SQLite? Available at: <https://www.sqlite.org/index.html> (accessed: 26.04.2021).
 14. Top 10 Best Build Automation Tools Speed Up Deployment Process. Available at: <https://uk.myservername.com/top-10-best-build-automation-tools-speed-up-deployment-process> (accessed: 26.04.2021).
 15. Accelerate developer productivity. Available at: <https://gradle.org/> (accessed: 26.04.2021).
 16. Muschko B. *Gradle in Action*. Manning Publications, 2014, 480 p.
 17. Dabir K., Abhinandan *Gradle Essentials: Master the fundamentals of Gradle using real-world projects with this quick and easy-to-read guide* (Community Experience Distilled). Packt Publishing, 2015, 176 p.
 18. Obzor terminologii SOA: Chast' 1. Servis, arhitektura, upravlenie i biznes-terminy [Overview of SOA Terminology: Part 1. Service, Architecture, Governance, and Business Terms]. Available at: <https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/ws-soa-term1/?lnk=hm> (accessed: 26.04.2021).
 19. Gudov A. M., Zavozkin S. Ju., Trofimov S. N. *Tehnologija razrabotki programmnogo obespechenija: Uchebnoe posobie* [Software Development Technology: A Tutorial]. Kemerovo, 2009, 138.
 20. Pattern MVVM. Opredelenie patterna MVVM. Available at: <https://metanit.com/sharp/wpf/22.1.php> (accessed: 26.04.2021).

References (transliterated)

1. Willer M., Dunsire G. *Bibliographic Information Organization in the Semantic Web*. Chandos Publishing, 2013, 318 p., doi: 10.1016/B978-1-84334-731-6.50001-6.
2. Fitzgibbons M., Meert D. Are Bibliographic Management Software Search Interfaces Reliable?: A Comparison between Search Results Obtained Using Database Interfaces and the EndNote Online Search Function. *The Journal of*

Відомості про авторів (About authors)

Цибульник Сергій Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри приладів і систем орієнтації і навігації; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-4462-0936; e-mail: tsubulnik.s.a@gmail.com.

Serhii Tsubulnyk – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Orientation and Navigation Instruments and Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4462-0936; e-mail: tsubulnik.s.a@gmail.com.

Бідник Данило Сергійович – студент кафедри приладів і систем орієнтації і навігації; м. Київ, Україна.

Danylo Bidnyk – student, Department of Orientation and Navigation Instruments and Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Цибульник С. О., Бідник Д. С. Проектування архітектури автоматизованої бібліографічної системи. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. № 2 (8). С. 83-89. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.12.

Please cite this article as:

Tsubulnyk S., Bidnyk D. Design of the architecture of an automated bibliographic system. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 83-89, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.12.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Цыбульник С. А., Биднык Д. С. Проектирование архитектуры автоматизированной библиографической системы. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 83-89. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.12.

АННОТАЦІЯ Розвиток інформаційних і комп'ютерних технологій привело до необхідності еволюції концепції універсального бібліографічного контролю. Поява Інтернету і веб-технологій дозволило цій концепції вийти на новий рівень за рахунок створення ряду спільних міжнародних стандартів. Крім того, для забезпечення контролю і обміну бібліографічною інформацією були створені загальнодоступні бібліографічні і наукометричні бази даних. Сьогодні програмне забезпечення для управління бібліографічними записами користується попитом в різних країнах Європи і Америки. Найбільш популярним програмним забезпеченням в цій сфері є EndNote, RefWorks, BibTeX і Zotero. Розробка подібної автоматизованої бібліографічної системи і адаптація її функціонала до стандартів і вимогам в Україні актуальна по ряду причин. Серед основних причин можна відзначити необхідність кожного науково-педагогічного працівника вищих навчальних закладів підтвердити свої наукові досягнення при прийомі на роботу, представити наукову роботу на різних конкурсах, для отримання наукового звання або ученої ступені, і тому подібне. Швидке розвиток інформаційних і комп'ютерних технологій дозволяє сьогодні відмовитися від ведення переліку наукових робіт в ручному режимі і перейти до використання спеціалізованого програмного забезпечення на смартфонах. Спроектована архітектура автоматизованої бібліографічної системи, розроблена в формі мобільного застосунку на базі операційної системи Android. Показано, що більшість населення планети має мобільний телефон і найбільш популярною мобільною операційною системою є Android. Мовою програмування, на якій буде написане програмне забезпечення, обрано Java, оскільки переважна більшість операційної системи Android написана на цій мові. Для обраної операційної системи визначено ряд технологій, які дозволять спростити процес розробки мобільного застосунку. На основі багаторівневої моделі архітектури і шаблону MVVM спроектовано трішарову архітектуру автоматизованої бібліографічної системи. Ця архітектура дозволяє забезпечити основні нефункціональні характеристики якості розроблюваного програмного забезпечення, а також ефективно реалізувати правила бізнес-логіки в межах об'єктно-орієнтованої парадигми програмування.

Ключові слова: програмне забезпечення; Android; MVVM; програмна архітектура; бібліографічна база даних; Java

Надійшла (received) 02.05.2021

УДК 666. 1.031

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.13

ІНТЕГРАЦІЯ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИРОБНИЦТВІ АРХІТЕКТУРНО-БУДІВЕЛЬНОГО ФЛОАТ-СКЛА

Л. Л. БРАГІНА^{1*}, С. М. ЯЇЦЬКИЙ², Д. В. ПЕТРОВ¹, О. Є. СТАРОЛАТ¹

¹кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

²ТОВ «Лисичанський склозавод «Пролетарій», м. Лисичанськ, УКРАЇНА

*e-mail: bragina_l@ukr.net

АНОТАЦІЯ Проаналізовано сучасний стан технологій виробництва скляних виробів, що використовуються в архітектурно-будівельній галузі, типи енергозберігаючих флоат-стекел та їх роль у якості освітлення будівель. Показано актуальність використання low-E стекел, зокрема у склопакетах. Розглянуто інноваційні тенденції у виробництві листового архітектурно-будівельного флоат-скла із застосуванням сучасних технологій та обладнання, зокрема, на ПАТ «Лисичанський склозавод «Пролетарій». Встановлено, що суттєвим недоліком більш енергоефективних I-стекел, які мають широкий діапазон кольорних характеристик, є недостатня механічна міцність м'яких покриттів, що наносять магнетронним вакуумним напиленням. Показано, що технологія виготовлення низькоемісійних I-стекел з такими покриттями не дозволяє здійснювати їх гартування зі збереженням всіх необхідних експлуатаційних параметрів. Наведено фізико-хімічні властивості і експлуатаційні характеристики великогабаритних стекел з срібними, сонцезахисними м'якими покриттями, ламіновані, плоскі та радіусні загартовані стекла, а також сфери їх застосування. Досліджено принципи зміцнення м'яких магнетронних покриттів для одержання низькоемісійних Double Low-E стекел та склад, комбінації шарів і технологічні параметри нанесення багатшарових нанопокриттів загальною товщиною до 140 нм, що дозволяє гартувати I-скло з цими покриттями. Проаналізовано технологічні параметри отримання низькоемісійних I-стекел з варіативними покриттями, які регулюють спектральні та експлуатаційні показники даних скловиробів за міждержавними стандартами ГОСТ EN 673–2016 і ГОСТ EN 410–2014. Розглянуто технологічні методики гартування листового скла із нанесеними низькоемісійними покриттями шляхом створення спеціальних їх складів та оптимізації процесів магнетронного нанесення, а також основні закономірності розташування шарів плівкової системи Si₃N₄ / NiCr / Si₃N₄ для витримування термічної обробки стекел системи R₂O–RO–SiO₂. Запропоновано принципи корегування їх спектральних і механічних характеристик в залежності від концентрації та співвідношення компонентів тонкоплівкового нанощару, що сприятиме створенню варіаційного ряду флоат-стекел з необхідним рівнем відбиття в інфрачервоному спектрі.

Ключові слова: флоат-скло; Low-E покриття; безпечні стекла; технології магнетронного напилення; гартування скла; спектральні характеристики; архітектурно-будівельна галузь; інфрачервоний спектр

INTEGRATION OF MODERN TECHNOLOGY FOR ARCHITECTURAL-BUILDING GLASS PRODUCTION

L. BRAGINA^{1*}, S. YAITSKY², D. PETROV¹, O. STAROLAT¹

¹Department of ceramic, refractories, glass and enamels technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

²LLC "Lysychansk glass factory", Lysychansk, UKRAINE

ABSTRACT The current state of technologies for the production of glass products used in the architectural and construction industry, types of the energy-saving float-glasses and their role in the lighting quality of the buildings was analyzed. The relevance of the use of Low-E glass, in particular in the glass units, is shown. Innovative trends in the production of sheet architectural and construction float glass with the use of modern technologies and equipment, in particular, at PJSC "Lysychansk glass factory "Proletary", considered. It is established that a significant disadvantage of more energy-efficient I-glasses, which have a wide range of color characteristics, is the insufficient mechanical strength of soft coatings applied by magnetron vacuum spraying. It is shown that the technology of manufacturing low-emission I-glasses with such coatings does not allow them to be hardened while maintaining all the necessary operating parameters. Physicochemical properties and operational characteristics of large-sized glasses with silver, sunscreen soft coating, laminated, flat and radial tempered glasses, as well as their areas of application are presented. The principles of strengthening soft magnetron coatings for low-emission Double Low-E glasses and composition, layer combinations and technological parameters of multilayer nanocoatings with a total thickness of up to 140 nm, which allows to harden I-glass with these coatings, investigated. The technological parameters of obtaining low-emission I-glasses with variable coatings, which regulate the spectral and operational indicators of these glassware according to the interstate standards GOST EN 673-2016 and GOST EN 410-2014, are analyzed. Technological methods of the sheet glass with low-emission coatings hardening by creating of the special compositions and optimizing magnetron sputtering processes optimizing, as well as the basic regularities of the arrangement of the film layers of the Si₃N₄ / NiCr / Si₃N₄ film for the heat treatment withstanding of the glasses in the R₂O – RO – SiO₂ system are considered. The principles of adjusting their spectral and mechanical characteristics depending on the

concentration and ratio of the components of the thin-film nanolayer, which will contribute to the creation of a variation series of float glasses with the required level of reflection in the infrared spectrum, are proposed.

Keywords: float glass; Low-E coatings; safety glasses; magnetron sputtering technology; glass hardening; spectral characteristics; architectural and construction industry; infrared spectrum

Introduction

Giving of the fundamentally new performance characteristics to the architectural and construction polished glass through the use of scientific achievements advances and advanced technologies has contributed to a significant expansion of its application [1,2]. Providing high light, heat and sound insulation of premises, almost absolute environmental friendliness, a significant reduction in lighting costs, a significant speed of construction, as well as a significant improvement in the strength of glassware in combination with giving them different shapes, - all these factors have led to a new level urban ideas about the role of glass [3,4].

Energy-efficient windows have become extremely popular, and their widespread use in Europe has grown significantly in recent decades.

Window structures of double glass appeared, which opened new opportunities in architectural construction [5]. In the 90s of the last century, thanks to advances in float glass technology, an alternative to them were the so-called low-emission glass including with special coatings [6]. Light-protective glasses change the spectral properties of the light that passes through them, create a more comfortable, compared to colorless glass, lighting and provides high clarity of perception of objects and do not cause eye fatigue. Such glass significantly reduces the flow of heat into buildings and protects against the destructive effects of ultraviolet rays [7].

Light-protective float glass is widely used for lighting buildings, where there is a problem of reducing the brightness of lighting, there is a need for one-sided inspection of the premises during the day and special requirements for interior parameters, as well as for facade and interior design of administrative, public and residential premises. furniture, etc. When using low-emission glass in double-glazed windows filling the interglazed space with inert gas leads to an additional increase in heat transfer resistance by 7 - 10%, while in the case of ordinary double-glazed windows this measure does not create the desired effect.

Low-E glasses include hardening safety glass, which is used mainly in multi-storey offices and other public buildings to ensure strict safety standards. There are two types of low-E glasses: the first type is painted in bulk with metal oxides in bronze, gray, blue and other colors. These components provide the absorption of solar thermal radiation and reduce transmission in the visible part of the spectrum, thereby achieving the desired effect. The second type includes glasses with special coatings that provide a similar effect [8]. The disadvantage of light-protective glasses, colored in bulk, is a fairly significant cost due to the use of very expensive and scarce, especially in Ukraine, dyes, as well as the complexity of the cooking process of this type of glass

[9]. Thus, to obtain glasses colored with compounds of manganese, chromium, copper, an oxidizing medium is required, while sulfide selenium glasses and "copper ruby" require a reducing or neutral atmosphere. In addition, the peculiarity of cooking colored glass is associated with low thermal conductivity of glass, which greatly limits the possibilities of the manufacturing modern methods widespread use such sheet glass [9]. [10]. Low-emission glasses with special coatings only a few tens of nanometers thick, making them completely transparent to the human eye, have presented serious competition to the first type of glass [11].

The goal of the work

The main purpose of the work was to analyze the innovative trends of low-emission glass integrated technologies and their problems, as well as to develop ways of the significantly improve this product in Ukraine.

The main results and their discussion

Recently, the volume of production of laminated glasses with special films and inorganic nanocoatings has increased significantly. They are able to have the same functional characteristics as the above low-emission glasses, that is they can be energy-saving, sun-proof, etc.

The use of inorganic coatings has significant advantages over laminating films due to their significant durability. Typically, laminated glass is a triplex made by gluing glass plates with a special polymer film PVB under conditions of significant pressure and high temperature. The hardened, reflective, energy-saving float glasses with silk-screen printing or color printing are used as initial. Bonding glass does not increase the mechanical strength of the components of the triplex, but due to the formed layers in the whole product as a whole increases the resistance to fracture. In addition, triplex belongs to a safe group of glasses due to the fact that when it is destroyed, the fragments do not fly away, but remain on the film [12].

Modern safety glasses include flat and curved hardened glasses. The first of them is an indispensable material for the building industry during the closing of high-rise buildings, offices and banks, mansard windows, greenhouses, subway cars, passenger trains, trams, passenger transport; with the prepared details of the side-by-side technology (folding shelves for refrigerators and ovens), spare parts of furniture; decorative glassware with a color digital signet [13].

Among the glasses with non-vacuum coatings should be noted silver mirrors and glasses with color photo printing, which are widely used in solving the design of various rooms [12]. The advantages of digital color printing on glass consist of a wide range of colors;

at the same time thanks to the further heat treatment glassware has all advantages of the tempered glass: the increased durability, resistance to any mechanical damages, ultraviolet radiation, influence of such aggressive environments, as atmospheric precipitations, chemical reagents.

However, the greatest attention is paid to glasses that are integrated with functional coatings. This type includes low-emission glass [14]. Today, two types of low-emission coated glasses are produced: the so-called I-glass (Double Low-E) with a soft coating applied by magnetron in vacuum, and K-glass (Low-E) with a hard metal oxide coating applied directly on the surface of the still hot glass in the production process by pyrolysis. These glasses differ mainly in the values of the coefficient of emissivity, hardness and technology of their production.

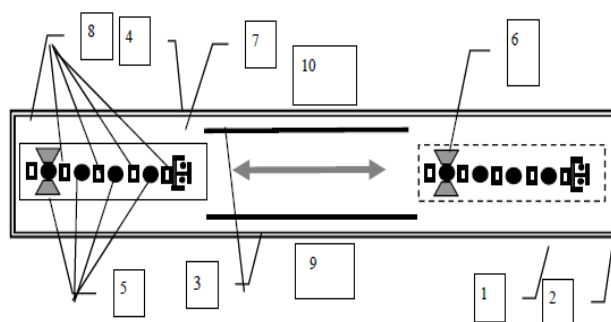
I-glass has high energy-saving properties. It successfully reflects infrared radiation and partly - ultraviolet, its heat transfer coefficient does not exceed 0.1. The service life of such glass is unlimited, but provided that adequate protection against abrasive effects due to insufficient hardness of the coating. Therefore, I-glasses are used in double-glazed windows with a layer sprayed inside these products, but their use for single glazing is virtually excluded.

K-glasses with non-vacuum coatings, which are characterized by special strength and are called solid, are devoid of this disadvantage. These glasses have become widespread due to the neutral color, ease of processing and high thermal insulation properties. They can be subjected to hardening, painting [13], used in the manufacture of multilayer and single glazing systems. The disadvantage of such glasses, from the point of view of the architectural industry, is the impossibility of varying their color shade. Therefore, special Low-E float glasses need special attention.

The main feature of low-emission float glass is the high values of light transmission and transparency, which is due to the high absorption index in the infrared zone (800–2000 nm) and the coefficient of thermal insulation. In this work, to obtain such glasses with a "soft" coating on the surface of the finished float glass after cooling by cathodic sputtering in an electromagnetic field under vacuum on a magnetron installation GC-254H (fig. 1) was coated with metal-containing layers, alternating with dielectric (oxides of BiO_x , TiO_2 , ZnO , etc.). Their choice depended on the required characteristics of these properties.

For preliminary calculations of the coatings composition used a coating designer, the action of which is based on the software of modeling the spectrum of SCOUT. We calculated the coordinates x , y , z of the desired color (fig. 2), which the program converted to L^* , A^* , B^* , RGB coordinates (red, green, blue), and the allowable values of the transmission coefficients in certain spectral ranges. Thanks to the software, a preview of the change in the optical model and spectral characteristics in the process of calculating the thickness

of the individual layers of the coating carried out. To characterize the spectrum, the dominant wavelength was calculated, which reflects the position of pure spectral colors in the $x - y$ plane (from 380 to 700 nm) relative to white and facilitates the choice of spectrum. Light transmission and reflection coefficients, sunlight transmission and reflection coefficients, color rendering index were calculated according to color coordinates.



1 – vacuum chamber, 2 – doors, 3 – glass, 4 – carriage, 5 – MRS, 6 – streams of atomized atoms, 7 – ion source, 8 – anodes, 9 – light source, 10 – optical registration system

Fig. 1 – Vacuum installation for magnetron sputtering of the coatings

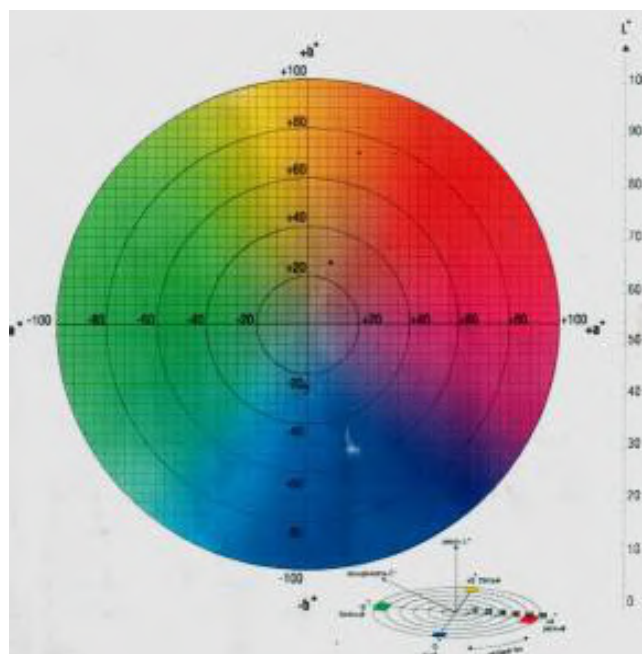


Fig. 2 – Color coordinates to calculate the properties of the optical coating

However, oxide components, which are typical components of the low-emission glasses nanocoating, are subject to destruction during heat treatment at the

hardening. However, the nitride components are resistant to quenching temperatures. Therefore, it was proposed to replace the composition of the multifunctional coating components to simultaneously preserve the color and spectral properties with the possibility of hardening. SnO_2 in the adhesion layers was replaced by silicon nitride Si_3N_4 and silicon nitride doped with aluminum $\text{Si}_3\text{N}_4:\text{Al}$ (SiAl). They, like SnO_2 , correct the color characteristics of the glass well, but, having much greater strength, provide a significant strengthening of the "soft" coating at a very small thickness (up to 140 nm). Their application to the glass was carried out by magnetron cathodic sputtering of targets containing silicon. In particular, a target with a content of from 80 to 95 wt.% Si and from 5 to 20 wt.% Al was used to apply the SiAl adhesive layer. For a similar purpose, the Cr darkening layer was replaced with a thinner NiCr layer. All this allowed to obtain low-emission float glasses with reinforced soft coatings, resistant to external influences, which are subject to hardening. The thickness of the barrier layer in them is from 5 to 50 nm, preferably from 10 to 30 nm. This allowed to achieve low values of surface resistance (4 Ohm) and satisfactory flexibility. In addition, the coating due to the barrier layer of the specified thickness reliably protected the glass in a humid atmosphere.

For the variation of color characteristics, a system of arrangement of I-glass coating layers with different values of the required spectral characteristics was developed (Fig. 3).

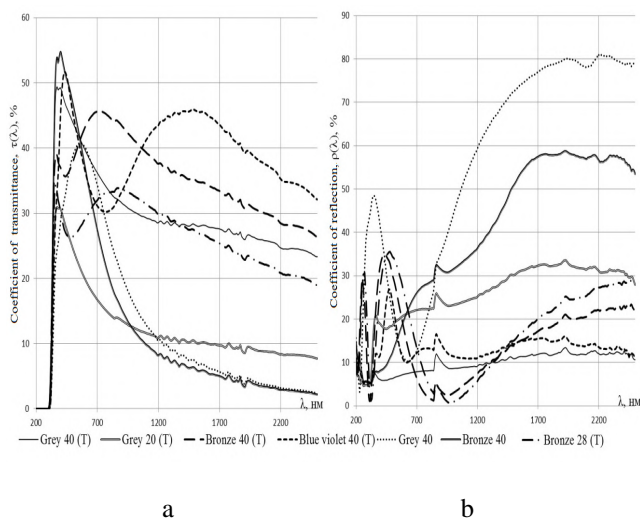


Fig. 3 – Features of transmission (a) and visibility (b) of created glasses

According to the results of testing for gritting, the glasses correspond the standards of annealing R 43.

During the tests for mechanical strength through the abrasion, it was found that the composition of the coating changing allowed to increase this parameter from 200 to 1000 abrasions. Technological parameters for the creating of low-energy I-glasses with variable coatings,

which regulate spectral and exploitation indicators, made it possible to obtain multifunctional low-energy float glasses in accordance with the international standards GOST EN 410–2014 and GOST EN 673-2016. They have been successfully implemented at the LLC “Lysychansk Glass Factory” and in the architectural and construction industry.

Conclusions

Thus, the analysis of innovative trends in integrated technologies of low-emission float glasses showed the relevance of their use in architecture and construction and the advantages of I-glass with so-called soft magnetron coatings over K-glasses with hard pyrolysis coatings.

Replacement of oxide components of magnetron multilayer nanocoatings with nitride, as well as development of technological parameters of their application allowed to significantly increase the mechanical strength of coatings, provide the necessary spectral and color characteristics of finished glass products and carry out the hardening process.

The implementation of these results at Lysychansky Glass Factory LLC has led to the production of products at the level of the best world analogues, which are successfully used in the architectural and construction industry.

Список літератури

- Holand W., Beall G. *Glass Ceramic Technology*. New Jersey: JohnWiley & Sons, 2012. 360 p.
- Jelle B. P., Kalnaes S. E., Tan Gao. Low-Emissivity Materials for Building Applications: A State of the Art Review and Future Research Perspectives. *Energy and Buildings*. 2015. № 3. P. 96–106. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.03.024
- Carter B. C., Norton M. G. *Ceramic Materials. Science and Engineering*. Springer, 2013. 775 p.
- F. Bos, C. Louter. Structural Glass in Architecture, *Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture*, Chapter 9.1. 01 February 2021. doi: 10.1002/9781118801017.ch9.1
- Shelby J. E. *Introduction to Glass Science and Technology*. Second Edition. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2005. 224 p.
- Mohelnikova J. Window Glass Coatings. *Green Energy and Technol.* 2011. № 33. P. 913-934.
- Брагіна Л. Л., Яицкий С. Н., Машкин В. В. Архитектурно-строительные стекла с низкоэмиссионными энергосберегающими покрытиями. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2014. № 16. С. 165-173.
- Яцишин Й. М. *Технологія скла у трьох частинах. Ч. III*. Львів: Видавництво «Растр-7», 2011. 149 с.
- Hartmann P., Jedamzik R., Reichel S., Schreder B. Optical glass and glass ceramic historical aspects and recent developments: A Schott view. *Applied Optics*. 2010. Vol. 49, No. 16. P. D 157–D 176. doi: 10.1364/AO.49.00D157.
- Петров Д. В., Брагіна Л. Л., Петрова А. М. Проблеми технології варки оптичного скла на етапах гомогенізації

- та освітлення. *Питання хімії і хімічної технології*. 2020. № 5. С. 68-72. doi: 10.32434/0321-4095-2020-132-5-68-72.
11. Bull S. J. Elastic properties of multilayer oxide coatings on float glass. *Vacuum*. 2015. № 114. P. 150–157. doi: 10.1016/j.vacuum.2014.12.012.
 12. Kleideiter G. Function and Production of Coating on Architectural Glass. Basics and overview. *Leybold optics*. 2010.
 13. Петров В. Н., Петров Д. В., Брагіна Л. Л., Філоненко С. В. Особливості формування оптичних скловиробів складної конфігурації. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. 2016. № 22 (1194). С. 136-139.
 14. Немілов С. В. *Оптическое материаловедение: Оптическое стекло: Учебное пособие*. СПб: СПбГУ ИТМО. 2011. 175 с.
 7. Bragina L. L., Yaittskii S.N., Mashkin V. V. Arhitekturno-stroitel'nye stekla s nizkojemiSSIONnymi jenergosberegajushhimi pokrytjami [Architectural and building glass with low-emission energy-saving coatings]. *Bulleten of NTU "KhPI"*, 2014, no. 16, pp. 165-173.
 8. Yashhy'shy`n J. M. *Texnologiya skla u tr`ox chasty`nax*. [Glass technology in three parts]. Part III, Lviv. Raster-7 Publishing House, 2011, 149 p.
 9. Hartmann P., Jedamzik R., Reichel S., Schreder B. Optical glass and glass ceramic historical aspects and recent developments: A Schott view. *Applied Optics*, 2010. Vol. 49, no. 16, pp. D 157–D 176. doi: 10.1364/AO.49.00D157.
 10. Petrov D. V., Bragina L. L., Petrova A. M. Problemy` texnologiyi varky` opy`chnogo skla na etapax gomogenizaciyi ta osvittennya [Problems of optical glass cooking technology at the stages of homogenization and lighting]. *Py`tannya ximiyi i ximichnoyi texnologiyi* [Questions of chemistry and chemical technology], 2020, no. 5, pp. 68-72, doi: 10.32434/0321-4095-2020-132-5-68-72.

References (transliterated)

1. Holand W., Beall G. *Glass Ceramic Technology*. New Jersey: JohnWiley & Sons, 2012. 360 p.
2. Jelle B. P, Kalnaes S. E., Tan Gao. Low-Emissivity Materials for Building Applications: A State of the Art Review and Future Research Perspectives. *Energy and Buildings*, 2015, no. 3, pp. 96–106, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.03.024
3. Carter B. C., Norton M. G. *Ceramic Materials. Science and Engineering*. Springer, 2013. 775 p.
4. Bos F., Louter C. Structural Glass in Architecture, *Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture*, Chapter 9.1. 01 February 2021. doi: 10.1002/9781118801017.ch9.1
5. Shelby J. E. *Introduction to Glass Science and Technology*. Second Edition. Cambridge. The Royal Society of Chemistry, 2005. 224 p.
6. Mohelnikova J. Window Glass Coatings. *Green Energy and Technol.*, 2011, no. 33, pp. 913-934.
11. Bull S. J. Elastic properties of multilayer oxide coatings on float glass. *Vacuum*, 2015, no. 114, pp. 150–157, doi: 10.1016/j.vacuum.2014.12.012.
12. Kleideiter G. Function and Production of Coating on Architectural Glass. Basics and overview. *Leybold optics*, 2010.
13. Petrov V. N., Petrov D. V., Bragina L. L., Filonenko S. V. Osobly`vosti formuvannya opy`chny`x sklovy`roviv skladnoyi konfiguraciyi [Features of Optical Products of Complex Configuration Forming]. *Visnyk NTU «XPI». Seriya: Ximiya, ximichna texnologiya ta ekologiya* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Chemistry, chemical technology and environment], 2016, no. 22, pp. 136-139.
14. Nemilov, S. V. *Opticheskoe materialovedenie: Opticheskoe steklo: uchebn. posobie*. [Optical material science: optical glass], SPb: SPbU ITMO, 2011, 175 p.

Відомості про авторів (About authors)

Liudmyla Bragina – Dr. Sci., professor, Department of ceramic, refractories, glass and enamels technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4029-0941; e-mail: bragina_l@ukr.net.

Брагіна Людмила Лазарівна – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; ORCID : 0000-0002-4029-0941; e-mail: bragina_l@ukr.net.

Serhiy Yaitsky – General Director of Lysychansk Glass Plant LLC; Lugansk region, Lysychansk; ORCID : 0000-0003-2525-1773; Ukraine; e-mail: tehnolog183@gmail.com

Яїцький Сергій Миколайович – генеральний директор ТОВ «Лисичанський скляний завод»; Луганська область, м. Лисичанськ, Україна; ORCID : 0000-0003-2525-1773; e-mail: tehnolog183@gmail.com.

Dmytro Petrov – Ph. D., Department of ceramic, refractories, glass and enamels technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7571-8592; e-mail: petrovdmytro@ukr.net.

Петров Дмитро Вікторович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-7571-8592; e-mail: petrovdmytro@ukr.net.

Olena Starolat – Researcher; National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Department of Ceramics, Refractories, Glass and Enamels; Kharkiv; Ukraine; ORCID: 0000-0003-2742-2628; e-mail: le_star@ukr.net

Старолат Олена Євгенівна – науковий співробітник; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2742-2628; e-mail: le_star@ukr.net

Please cite this article as:

Bragina L., Yaitsky S., Petrov D., Starolat O. Investigation of performance characteristics of furnaces for the production of optical and special float glasses. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 90–95, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.13.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Брагіна Л. Л., Яїцький С. Н., Петров Д. В., Старолат О. Є. Інтеграція технологій у виробництві архітектурно-будівельного скла. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 90–95. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.13.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Брагина Л. Л., Яицкий С. Н., Петров Д. В., Старолат Е. Е. Исследование эксплуатационных характеристик тепловых печей при производстве оптического и специального флоат стекол. *Вестник Национального технического университета «ХПИ».* Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 90–95. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.13.

АННОТАЦІЯ Проаналізовано сучасне становище технологій виробництва скляних виробів, використовуваних в архітектурно-будівельній галузі. Показано актуальність використання low-E стекол, в частині в склопакетах. Розглянуті інноваційні тенденції в виробництві листового архітектурно-будівельного флоат-стекла з використанням сучасних технологій та обладнання, зокрема, на ОАО «Лисичанський склозавод «Пролетарій». Встановлено, що суттєвим недоліком енергозаконних E-стекел, які мають широкий діапазон кольорових характеристик, є недостатня механічна міцність м'яких покриттів, наносимих магнетронним вакуумним напыленням. Показано, що технологія виготовлення E-стекел з такими покриттями не дозволяє здійснювати їх закалку з збереженням всіх необхідних експлуатаційних параметрів. Приведені фізико-хімічні властивості та експлуатаційні характеристики великогабаритних стекел з сріблястими, сонцезахисними м'якими покриттями, ламінованих, плоских та радіусних закалених стекел, а також сфери їх застосування. Досліджені принципи укріплення м'яких магнетронних покриттів для отримання низькоемісійних Double Low-E стекел, їх склад, комбінації шарів та технологічні параметри нанесення багаторішних нанопокриттів загальної товщиною до 140 нм, що дозволило закаляти E-стекло з ними. Проаналізовані технологічні параметри отримання низькоемісійних E-стекел з варіативними покриттями, які регулюють спектральні та експлуатаційні показники даних склопродуктів згідно з міждержавними стандартами ГОСТ EN 673-2016 та ГОСТ EN 410-2014. Розглянуті технологічні методики закладки листового скла з нанесеними низькоемісійними покриттями шляхом створення спеціальних складів та оптимізації процесів магнетронного нанесення. Розглянуті основні закономірності розташування шарів пліночної системи $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{NiCr} / \text{Si}_3\text{N}_4$ для утримання термічної обробки стекел системи $\text{R}_2\text{O-RO-SiO}_2$ та запропоновані принципи корективної їх спектральних та механічних характеристик в залежності від концентрації та співвідношення компонентів тонкопліночного покриття, що буде сприяти створенню варіаційного ряду флоат-стекел з необхідним рівнем відбиття в інфрачервоному спектрі.

Ключові слова: флоат-стекло; Low-E покриття; безпечні скла; технології магнетронного напылення; закалка скла; спектральні характеристики; будівельна галузь; інфрачервоний діапазон

Received 02.05.2021

УДК 66.041

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.14

КОНСТРУКТИВНЕ ОФОРМЛЕННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ У ВИПАЛЮВАЛЬНИХ ШАХТНИХ ПЕЧАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА

В. С. ВИТЯГАНЕЦЬ, В. П. ШАПОРЕВ, І. В. ПІТАК, А. О. БАРАНОВА*

кафедра хімічної техніки та промислової екології, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: baranova647@gmail.com

АНОТАЦІЯ У статті проаналізовано шахтні печі для виробництва вапна. За способом випалювання шахтні печі бувають пересипні, напівгазові, на газоподібному і рідкому паливі. Встановлено недоліки роботи основних сучасних печей при випалюванні вапна. Основними агрегатами для великотоннажного виробництва вапна є шахтні вапняково-випалювальні печі, в яких в якості палива використовуються доменний кокс або антрацит або сортові вугілля. Як правило тощі види палива застосовують у виробництвах, де поряд у технологічному циклі використовується вуглекислий газ, який міститься у топкових газах з концентрацією 36–40%_{мас.} Дані по експлуатації шести печей на території України на підприємствах показали, що основного поширення набули газові шахтні печі циліндричного і щілинного типу з прямим профілем футерування продуктивністю від 100 до 250 т/добу, діаметром шахти від 3,2 до 5,4 м і висотою 6–8 діаметрів печі. Найчастіше на них використовуються системи опалення з центральним і двома рядами периферійних інжекційних пальників без висову. Найбільш відповідальною частиною усіх печей є розподіл швидкостей газового потоку по перетину шахти печі й глибина радіального проникнення газового потоку в шар матеріалу. Розрахунки τ_1 і τ_{II} проводилися таким чином: для τ_1 вибирали інтервал температур середовища від 1300 до 250–300 °С, для τ_{II} – вибирався інтервал температур для матеріалу від 1000 до 100 °С і враховувалася щільність продукту при ступеня розкладання вапняку 98% (=1700 кг/м³). У зоні підігріву лімітуючою стадією є підведення тепла від газу до кускових матеріалів і при цьому можна прийняти рівним ~ 400–450 кДж/(м²·год·К) і τ_1 оцінюється 0,8–1 години. Загальний час перебування матеріалу в печі (зоні підігріву і зоні випалу) оцінюється 1,4–1,5 години, середня швидкість переміщення матеріалу в циліндричній частині печі оцінюється як 0,004 м/с, що дозволяє вважати, що фільтрується шар умовно нерухомим. Зазначені характеристики впливають на якість вапняку і рівномірність випалу вапняку, що і було основою конструктивного оформлення випалювальних печей шахтних з використанням газоподібного палива.

Ключові слова: шахтна піч; вапно; виробництво вапна; випал вапняку; газовий потік

CONSTRUCTIVE DESIGN AND FEATURES OF THE PROCESSES IN THE ROASTING SHAFT FURNACES BY USING GASEOUS FUEL

V. VYTYAHANETS, V. SHAPOREV, I. PITAK, A. BARANOVA

Department of chemical engineering and industrial ecology, NTU “KhPI”, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The article analyzes shaft furnaces for lime production. According to the method of firing, shaft furnaces are of bulk type, semi-gas type, gaseous and liquid fuels. The disadvantages of the operation of the main modern kilns during lime burning have been established. The main aggregates for high-tonnage lime production are mine lime kilns, in which blast furnace coke or anthracite, or high-quality coals are used as fuel. Generally, lean fuels are used in industries where, together with the technological cycle, carbon dioxide is used, which are contained in flue gases with a concentration of 36–40%_{mass}. The data on the operation of six furnaces on the territory of Ukraine at the enterprises showed that gas shaft furnaces of cylindrical and slotted type with a straight-lining profile were widely used. The parameters of such furnaces are productivity from 100 to 250 tons per day, shaft diameter from 3.2 to 5.4 m, and height 6–8 furnace diameters. Most often, they use heating systems with central and two rows of peripheral injection burners without protrusion. The most critical part of all furnaces is the distribution of gas flow rates over the cross-section of the furnace shaft and the depth of radial penetration of the gas flow into the material layer. Calculations of τ_1 and τ_{II} were carried out in the following way: for τ_1 , the temperature range of the medium was chosen from 1300 to 250–300 °C, τ_{ox} – the temperature range for the material was chosen from 1000 to 100 °C and the density of the product was taken into account at the degree of decomposition of limestone 98% (=1700 kg/m³). In the preheating zone, the limiting stage is the supply of heat from the gas to the lump material, and at the same time can be taken equal to $\approx 400–450$ kJ/(m²·h·K) and τ_1 is estimated as 0.8–1 hour. The total residence time of the material in the furnace (in the heating zone and in the firing zone) is estimated at 1.4–1.5 hours. The average speed of material movement in the cylindrical part of the furnace is estimated as 0.004 m/s, which makes it possible to consider the filtering layer conditionally stationary. These characteristics affect the quality of limestone and the uniformity of limestone firing that was the basis for the design of roasting shaft kilns using gaseous fuel.

Keywords: shaft furnace; lime, lime production; limestone roasting; gas flow

Вступ

До вапна, що споживається для технологічних цілей різними галузями промисловості, і відповідно до його якості висувають різноманітні вимоги. Для забезпечення різних галузей народного господарства вапном необхідної якості перед виробництвом завжди

стояла задача розробки нових технологічних режимів і конструкцій печей, що забезпечували б стабільне отримання продукту із заданими властивостями. Основними агрегатами для великотоннажного виробництва вапна є шахтні вапняково-випалювальні печі, в яких у якості палива використовуються доменний кокс або антрацит, або сортові вугілля. Як

правило тощі види палива застосовують у виробництвах, де разом у технологічному циклі використовується вуглекислий газ, що міститься у топкових газах із концентрацією 36–40%_{мас.}

Ряд виробництв, що забезпечують випуск високодисперсних наповнювачів та інгредієнтів за фізико-хімічними властивостями близькі до наноматеріалів першого роду, використовують в технологічному процесі.

Вапно із вмістом основної речовини $\text{CaO} > 96\%$, що містить $\text{CaO}_{\text{акт}} > 92\%$ і сумарним вмістом домішок менше ніж 1,5% [1]. Виробництво вапна для таких технологічних процесів вимагає не тільки певної підготовки вапняку або крейди до випалу, але в основному використання у якості палива природного газу, продукти спалювання якого виключають забруднення вапна [2].

До вищевказаного ряду виробництв належать виробництва хімічно осадженої крейди, високодисперсних оксиду і гідроксиду кальцію, гідрохлориду кальцію, кальцієвих наповнювачів для парфумерної та медичної промисловості та ін. Використання альтернативних джерел енергії з метою виробництва чистого продукту для проведення процесу випалу вапняку, як, наприклад, НВЧ-енергії [3], електрообігріву [4], сонячної енергії [5], проблематично, оскільки невідпрацьовані реакторні установки для реалізації процесу, а також досягнутий рівень досліджень [3–5] не дозволяють сподіватися на організацію в найближчому майбутньому великотоннажного виробництва вапна.

Тому застосування газоподібного палива в шахтних вапняно-випалювальних печах для виробництва високо випаленого вапна з високою активністю залишається необхідним прийомом.

Мета роботи

Опис, конструктивне оформлення випалювальних шахтних печей з використанням газоподібного палива і попередній аналіз особливостей протікають в них процесів.

Виклад основного матеріалу

Як показав аналіз даних з експлуатації шести печей на території України, на підприємствах, основного поширення набули газові шахтні печі циліндричного і щілинного типу з прямим профілем футерування продуктивністю від 100 до 250 т/добу, діаметром шахти від 3,2 до 5,4 м і висотою 6–8 діаметрів печі. Найчастіше на них використовуються системи опалення з центральної і двома рядами периферійних інжекційних пальників без висову [6]. Таким печам характерна висока питома витрата палива, що становить 4000–4700 кДж/кг, в продукті підвищений залишковий вміст CO_2 – до 12% і відносно низька реакційна здатність продукту за часом гасіння 25 хвилин. При цьому зміст $\text{CaO}_{\text{акт}}$ у продукті не перевищує 60–65%. З огляду на це, виробництво вапна з вмістом основної речовини \geq

96%, залишковим $\text{CO}_2 \leq 2\%$ і вмістом $\text{CaO}_{\text{акт}} > 90\%$ в таких печах ускладнений. Очевидно, що печі, що працюють на газоподібному паливі, витрачають тепла на 15–25% більше, ніж кращі печі на твердому паливі [7,8]. Перевитрата тепла викликається неповнотою згоряння в фільтраційному шарі через нерівномірний розподіл паливного газу за поперечним перерізом печі, несприятливих умов для перемішування газу з повітрям в шарі пускового матеріалу, в зв'язку з чим не може горіння газу, можливий недопал палива [9,10]. Крім того з цієї ж причини в шарі матеріалу можливе виникнення зон з аномально високою і відносно низькими температурами, що призводить до спікання продукту реакції або недопалом вихідної сировини (вапняку, крейди) [9,10]. Відомі розробки удосконалення щодо, конструктивного оформлення шахтних печей [11,12] з метою ліквідації вищезазначених недоліків, наприклад, удосконалення процесу спалювання природного газу з примусовим відхиленням факела або відведення частини підігрітого повітря з внутрішньої частини печі перед зоною оснащення печі балочним багатосопловим підігрівом, а також пальниками [12] не дають кардинального поліпшення при протіканні фільтраційного горіння палива.

Згідно дослідження [13] для термічної обробки полідисперсних порід регульована температурою теплоносія піч повинна характеризуватися такими особливостями: спалювання палива повинно здійснюватися поза шару матеріалу з отриманням продуктів горіння заданої температури; для забезпечення рівномірного розподілу теплоносія та зниження аеродинамічного опору рух газів в зоні випалу повинно відбуватися в перпендикулярному напрямку по відношенню до опускають матеріалу. Однак достовірні дані по експлуатації таких печей відсутні.

У всіх типах печей незалежно від конструктивного оформлення розрізняють три основні зони: зону підігріву, зону випалу і зону охолодження. Нерівномірний розподіл швидкостей газового потоку по перетину шахти впливає на робочі фракції вапняку, характер руху матеріалу в циліндричній частині печі.

Найкращим варіантом характеру режиму руху матеріалу є варіант, коли середні вертикальні швидкості \bar{V} великих шматків (0,06–0,08 м); менших шматків (0,03–0,04 м) в обсязі \bar{V}_V дрібних шматків в пристенній області \bar{V}_W рівні. У роботах [14,15] проведено чисельне моделювання течії сипучого матеріалу в реакторі шахтного типу і було з достатньою достовірністю встановлено, що вище вказаний варіант може досягатися при середньому розмірі дрібних шматків 0,03 м, середній розмір великих шматків – 0,07 м і відповідно масовому вмісті фракцій 25–30% і 70–75%. Слід зазначити, що таке співвідношення фракційного складу вапняків досягається перед подачею їх в піч при їх збагаченні з використанням фотоелектронного сепаратора.

Однак, загальноприйнятим є твердження, що у шахтну піч необхідно подавати розміри шматків

вапняку при співвідношенні $D_p/d > 45 - 50$. При цьому вважається, що розмір d не впливає на розподіл газового потоку [15]. Останнє свідчить про те, що вапняк має подаватися в піч чітко визначеної фракції, приблизно $d = 0,07-0,08$ м, при внутрішньому діаметрі печі $D_p = 3,7-5,5$ мм.

Проте, навіть при такому фракційному складі при русі матеріалу в циліндричній частині шахтної печі при центральному вивантаженні, спостерігається відміна приосьової та пристінної швидкостей у зоні випалу на 5–8% з переважанням приосьової. Ця нерівномірність може бути згладжена з використанням декількох отворів для вивантаження вапна поблизу стін. Таким чином питання про фракційний склад вапняку, що подається в піч і умовах рівномірного руху печі матеріалу з різним фракційним складом уздовж шахти теоретично і практично вирішене в відомій літературі.

Кінетика випалу вапняку за умови руху щільного шару матеріалу та фільтрації через цей шар топкових газів мало вивчена в багатьох роботах [2,7,8]. Для практичних випадків, коли кусковий шар матеріалу нагрівається гарячими газами час повного розкладання вапняку, тобто умовно час перебування у зоні випалу печі, може бути оцінений за рівнянням [7]:

$$\tau_{\text{п}} = \frac{Q_y \cdot \rho_0 \cdot C_0 \cdot r_0}{300 \cdot \alpha \cdot \lambda_0 \cdot \Delta T_2} \cdot \left[\frac{1 - E \cdot T_B}{\left(\lambda_0 + \frac{\alpha \cdot r_0}{2} \right) - \frac{1}{4} \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T_2 \cdot r_0} \right]$$

де Q_y – питома витрата тепла, кДж/кг; ρ_0 – щільність вапняку – 2553 кг/м³; C_0 – вміст СаСО₃, %мас.; r_0 – радіус шматка вапняку, м; α – коефіцієнт теплообміну в інтервалі температур від 950 – 1300 °С – 62,85–838 кДж/(м²·ч·К); ΔT_2 – різниця температур між газовим середовищем і речовиною, °С; λ_0 – коефіцієнт теплопровідності, кДж/(м·с·К),

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_T}{(1 + ET)}$$

де E – поправочний коефіцієнт $\sim 0,42 \cdot 10^{-3}$;

$$\lambda_T = \lambda_0(1 + ET).$$

У загальному випадку час перебування матеріалу в печі від моменту завантаження і до моменту вивантаження визначається сумою часу перебування у кожній із зон шахтної печі:

$$\tau_1 + \tau_{\text{п}} + \tau_{\text{ох}} = \tau$$

де τ_1 – час перебування в початковій зоні, год; $\tau_{\text{п}}$ – час перебування в зоні підігріву, год; $\tau_{\text{ох}}$ – час перебування в зоні охолодження, год.

Обговорення результатів

Відповідно до досліджень [7,8] розрахунок τ_1 і $\tau_{\text{п}}$ проводиться аналогічним способом, для τ_1 вибираємо інтервал температури середовища від 1300 до 250–300 °С, $\tau_{\text{ох}}$ – вибираємо інтервал температур для матеріалу від 1000 до 100 °С та враховується щільність продукту при ступені розкладу вапняку 98%

($\rho_{\text{СаО}} = 1700$ кг/м³). У зоні підігріву лімітуючою стадією є підведення тепла від газу до кускових матеріалів і при цьому можна прийняти рівним $\sim 400-450$ кДж/(м²·ч·К) [7] і τ_1 оцінюється 0,8÷1 год. Загальний час перебування матеріалу в печі (зоні підігріву і зоні випалу) оцінюється 1,4÷1,5 години, середня швидкість переміщення матеріалу з циліндричної частини печі оцінюється, як 0,004 м/с, що дозволяє вважати, що шар, який фільтрується умовно нерухомий.

Висновки

Таким чином, можна вважати, що найбільш відповідальною частиною усіх печей є розподіл швидкостей газового потоку по перетину шахти печі й глибина радіального проникнення газового потоку в шар матеріалу. Зазначені характеристики впливають на якість вапняку і рівномірність випалу вапняку, що і стало основою конструктивного оформлення випалювальних печей шахтних з використанням газоподібного палива.

Список літератури

1. Шапоров П. В., Питак И. В., Себко В. В. Шахтная печь для мягкого обжига известняка. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2013. № 3. С. 86–90.
2. Мешалкин В. П., Шулаев Н. С., Быковский Н. А., Аристов В. М. Физико-химические основы комбинированной энергоресурсоэффективной технологии переработки стоков производства кальцинированной соды. *Химия, науки о материалах*. 2020. Т. 494. С. 45–49.
3. Ишкильдин А. С. Подходы к построению систем автоматического контроля загазованности. *Современные технологии: достижения и инновации*. 2020. С. 466–467.
4. Пітак І. В., Шапоров П. В., Шапоров В. П., Протопопов Р. Я. Удосконалення виробництва вапняку в шахтних печах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2012. № 26. С. 33–41.
5. Пашенко А. А., Акрамов Р. А., Ибрагимов К. А. Свойства вяжущих синтезированных в солнечных печах. *Неорганические материалы*. 1985. № 5. С. 870–872.
6. Сокращение использования природного газа за счет перевода существующих известково-обжиговых печей на твердое топливо. *Сборник трудов I Междотраслевой научн.-практ. конф., молодых ученых и специалистов. «Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережения, охрана окружающей природной среды», 27–28 марта 2012*. Харьков. С. 122–134.
7. Матюхин В. И., Ярошенко Ю. Г., Журавлев С. Я., Морозова, Е. В., Матюхина А. В. Технологические возможности использования природного газа в шахтных печах для обжига известняка. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2020. 63 (1). С. 13–18.
8. Плотникова С. Е., Перегудов Ю. С., Горбунова Е. М., Нифталиев С. И. Перспективы применения жидких отходов производства кальцинированной соды в качестве хладоносителя на основе тройной системы СаСl₂-К₂Сr₂О₇-Н₂О. *Вестник Воронежского*

- государственного университета инженерных технологий. 2020. 82(3). С. 233–238.
9. Протасова Е. П., Пузиков Н. Т. Математическое моделирование и численный анализ шахтной печи известкового производства. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematic-heskoe-modelirovanie-i-chislennyy-analiz-shahtnoy-pechi-izvestkovogo-proizvodstva/viewer> (дата звернення 12.05.2021).
 10. Цховребова И. Б., Чочиева А. В., Шевчук П. С. Перспективы использования технические средства при проведении таможенного контроля делящихся и радиоактивных материалов. *Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия*. 2019. С. 51.
 11. Ильяшенко Н. И., Фильшин В. Е. Исследование аэродинамических характеристик шахтных известковых печей с принудительным отводом газа через kern. *Журнал Механика*. 1976. № 1. 168 с.
 12. Исследование процесса обжига известняка в шахтных печах с газообразным топливом. *Труды НИОХИМ*. Харьков. 1981. Т. 56. С. 64–76.
 13. Негадайлов А. А., Негадайлов П. А., Шапоров В. П. Оптимизация распределения кускового материала по диаметру шахтной печи с целью уменьшения вредных выбросов в атмосферный воздух от известнякового производства. *Экологічна безпека*. 2013. № 2. С. 97–102.
 14. Питак И. В., Шапоров П. В., Шестопалов А. В., Шапоров В. П. Совершенствование производства извести в шахтных печах. *Технологический аудит и резервы производства*. 2014. №6 (1). С. 59–63.
 15. Измалкова Т. В. Современные способы и методы оптимизации granulometricheskogo состава цементно-минеральных смесей. *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. С. 1188–1192.
- References (transliterated)**
1. Shaporev P. V., Pitak I. V., Sebko V. V. Shakhtnaya pech` dlya myagkogo obzhiga izvestnyaka [Shaft kiln for soft calcining of limestone]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*, 2013, no. 3, pp. 86–90.
 2. Meshalkin V. P., Shulaev N. S., By`kovskij N. A., Aristov V. M. Fiziko-khimicheskie osnovy` kombinirovannoy energoresursoeffektivnoy tekhnologii pererabotki stokov proizvodstva kal`czinirovannoy sody` [Physicochemical foundations of a combined energy-resource-efficient technology for processing effluents from the production of soda ash]. *Khimiya, nauki o materialakh*, 2020, Vol. 494, pp. 45–49.
 3. Ishkil`din A. S. Podkhody` k postroeniyu sistem avtomaticheskogo kontrolya zagazovannosti [Approaches to the construction of automatic gas control systems]. *Sovremennyye tekhnologii: dostizheniya i innovaczii*. 2020, pp. 466–467.
 4. Pitak I. V., Shaporev P. V., Shaporev V. P., Protopopov R. Ya. Udoskonalennya virobnicztva vapnyaku v shakhtnikh pechakh [Improving limestone production in mine kilns]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*, 2012, no. 26, pp. 33–41.
 5. Pashhenko A. A., Akramov R. A., Ibragimov K. A. Svoystva vyazhushhikh sintezirovanny`kh v solnechny`kh pechakh [Properties of binders synthesized in solar kilns]. *Neorganicheskie materialy`*, 1985, no.5, pp. 870–872.
 6. Sokrashhenie ispol`zovaniya prirodnogo gaza za schet perevoda sushhestvuyushhikh izvestkovo-obzhigovy`kh pechej na tverdoe toplivo [Reducing the use of natural gas by converting existing lime kilns to solid fuels]. *Collection of works I Interdisciplinary scientific and practical. Conf., young scientists and specialists. "Innovative ways of modernizing basic industries, energy and resource conservation, environmental protection"*, March 27–28, 2012, Kharkiv, pp. 122–134.
 7. Matyukhin V. I., Yaroshenko Yu. G., Zhuravlev S. Ya., Morozova E. V., Matyukhina A. V. Tekhnologicheskiye vozmozhnosti ispolzovaniya prirodnogo gaza v shakhtnykh pechakh dlya obzhiga izvestnyaka [Technological possibilities of using natural gas in shaft kilns for calcining limestone]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2020, 63 (1), pp. 13–18.
 8. Plotnikova S. E., Peregudov Yu. S., Gorbunova E. M., Niftaliev S. I. Perspektivy` primeneniya zhidkikh otkhodov proizvodstva kal`czinirovannoy sody` v kachestve khladonositelya na osnove trojnoy sistemy` CaCl2-K2Cr2O7-H2O [Prospects for the use of liquid waste from soda ash production as a coolant based on the CaCl2-K2Cr2O7-H2O ternary system]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologij*, 2020, no. 82(3), pp. 233–238.
 9. Protasova E. P., Puzikov N. T. Matematicheskoe modelirovanie i chislenny` analiz shakhtnoj pechi izvestkovogo proizvodstva [Mathematical modeling and numerical analysis of a shaft kiln of lime production]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematic-heskoe-modelirovanie-i-chislennyy-analiz-shahtnoy-pechi-izvestkovogo-proizvodstva/viewer> (accessed 12.05.2021).
 10. Czkhovrebowa I. B., Chochieva A. V., Shevchuk P. S. Perspektivy` ispol`zovaniya tekhnicheskie sredstva pri provedenii tamozhennogo kontrolya delyashhikhsya i radioaktivny`kh materialov [Prospects for the use of technical means during customs control of fissile and radioactive materials]. *Nauka i innovaczii v XXI veke: aktual`ny`e voprosy`, otkry`tiya*, 2019, p. 51.
 11. Il'yashenko N. I., Fil`shin V. E. Issledovanie ae`rodynamiceskikh kharakteristik shakhtny`kh izvestkovy`kh pechej s prinuditel`ny`m otvodom gaza cherez kern [Investigation of the aerodynamic characteristics of shaft lime kilns with forced gas removal through the core]. *Zhurnal Mekhanika*, 1976, no. 1, 168 p.
 12. Issledovanie proczessa obzhiga izvestnyaka v shakhtny`kh pechakh s gazoobrazny`m toplivom [Investigation of the process of calcining limestone in shaft furnaces with gaseous fuel]. *Proceedings of NIOCHEM*, Kharkiv, 1981, Vol. 56, pp. 64–76.
 13. Negadajlov A. A., Negadajlov P. A., Shaporyev V. P. Optimizaczija raspredeleniya kuskovogo materiala po diametru shakhtnoj pechi s czel`yu umen`sheniya vredny`kh vy`brosov v atmosfery`j vozdukh ot izvestnyakovogo proizvodstva [Optimization of the distribution of lumpy material along the diameter of the shaft furnace in order to reduce harmful emissions into the atmospheric air from limestone production]. *Ekologi`chna bezpeka*, 2013, no. 2, pp. 97–102.
 14. Pitak I. V., Shaporev P. V., Shestopalov A. V., Shaporev V. P. Sovershenstvovanie proizvodstva izvesti v shakhtny`kh pechakh [Improvement of lime production in shaft kilns]. *Tekhnologicheskij audit i rezervy` proizvodstva*, 2014, no. 6 (1), pp. 59–63.
 15. Izmal'kova T. V. Sovremennyye sposoby` i metody` optimizaczii granulometricheskogo sostava czementno-mineral`ny`kh smesej [Modern methods and methods for optimizing the granulometric composition of cement-mineral mixtures]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya molody`kh ucheny`kh BGTU im. V.G. Shukhova*. 2016, pp. 1188–1192.

Відомості про авторів (About authors)

Витяганець Валентин Сергійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-3314-6917, e-mail: Valentyn.Vytiahanets@mit.khpi.edu.ua

Valentin Vytiaganets – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", post-graduate student at the chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3314-6917, e-mail: Valentyn.Vytiahanets@mit.khpi.edu.ua

Шаповров Валерій Павлович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-1652-4688, e-mail: Valerii.Shaporev@khpi.edu.ua

Valeriy Shaporev – Doctor of Technical Sciences, professor, National Polytechnic University "Kharkiv Polytechnic Institute", the head of Chemical engineering and industrial ecology Department of, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1652-4688, e-mail: Valerii.Shaporev@khpi.edu.ua

Пітак Інна Вячеславівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічна техніка та промислова екологія, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5073-2942, e-mail: Inna.Pitak@khpi.edu.ua

Inna Pitak – PhD, associate professor, National Polytechnic University "Kharkiv Polytechnic Institute", associate professor at the Chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5073-2942, e-mail: Inna.Pitak@khpi.edu.ua

Баранова Антоніна Олегівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ст. викладач кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1079-7856; e-mail: baranovaa647@gmail.com.

Antonina Baranova – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior lecturer at the Chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1079-7856; e-mail: baranovaa647@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Витяганець В. С., Шаповров В. П., Пітак І. В., Баранова А. О. Конструктивне оформлення та особливості процесів у випалювальних шахтних печах з використанням газоподібного палива. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2 021. № 2 (8). С. 96-100. doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.14.

Please cite this article as:

Vytiaganets V., Shaporev V., Pitak I., Baranova A. Constructive design and features of the processes in the roasting shaft furnaces by using gaseous fuel. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 96-100, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.14.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Витяганец В., Шаповров В., Пітак І., Баранова А. Конструктивное оформление и особенности процессов в обжиговых шахтных печах с использованием газообразного топлива. *Вестник НТУ «ХПІ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 96-100. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.14.

АНОТАЦІЯ В статтю проаналізовані шахтні печі для виробництва извести. По способу обжигу шахтні печі бувають пересыпные, полугазовые, на газообразном и жидком топливе. Установлены недостатки работы основных современных печей при обжиге извести. Основными агрегатами для многотоннажного производства извести являются шахтные известково-обжигательные печи, в которых в качестве топлива используются доменный кокс или антрацит, или сортовые угли. Как правило, тощие виды топлива применяют в производствах, где наряду в технологическом цикле используется углекислый газ, который содержится в топочных газах с концентрацией 36–40% масс. Данные по эксплуатации шести печей на территории Украины на предприятиях показали, что основное распространение получили газовые шахтные печи цилиндрического и шелевого типа с прямым профилем футеровки производительностью от 100 до 250 т/сутки, диаметром шахты от 3,2 до 5,4 м и высотой 6–8 диаметров печи. Чаще всего на них используются системы отопления с центральной и двумя рядами периферийных инжекционных горелок без высова. Наиболее ответственной частью всех печей является распределение скоростей газового потока по сечению шахты печи и глубина радиального проникновения газового потока в слой материала. Расчеты τ_1 и τ_2 проводились таким образом: для τ_1 выбирали интервал температур среды от 1300 до 250–300 °С, τ_{ox} – выбирался интервал температур для материала от 1000 до 100 °С и учитывалась плотность продукта при степени разложения известняка 98% (=1700 кг/м³). В зоне подогрева лимитирующей стадией является подвод тепла от газа к кусковому материалу и при этом "а" можно принять равным l 400–450 кДж/(м²·ч·К) и τ_1 оценивается 0,8÷1 часа. Общее время пребывания материала в печи (зоне подогрева и зоне обжигу) оценивается 1,4÷1,5 часа, средняя скорость перемещения материала в цилиндрической части печи оценивается как 0,004 м/с, что позволяет считать фильтрующийся слой условно неподвижным. Указанные характеристики оказывают влияние на качество известняка и равномерность обжигу известняка, что и являлось основой конструктивного оформления обжиговых печей шахтных с использованием газообразного топлива.

Ключевые слова: шахтная печь; известь; производство извести; обжиг известняка; газовый поток

Надійшла (received) 01.05.2021

УДК 621.35+621.43

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.15

ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ПОКРИТТЯ У ТЕХНОЛОГІЯХ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Г. В. КАРАКУРКЧИ^{1*}, М. Д. САХНЕНКО², І. Ю. ЄРМОЛЕНКО², С. М. ІНДИКОВ²,
Н. В. ГОРОХІВСЬКА², В. В. САРАЙ¹

¹Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

²кафедра фізичної хімії, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: anuyutikukr@gmail.com

АНОТАЦІЯ Проаналізовано технологічні підходи до застосування функціональних електрохімічних покриттів у технологіях цивільного та військового призначення. Показано, що наявні технічні рішення спрямовані на вирішення задач зміцнення і захисту поверхонь та детоксикації середовищ від забруднювальних агентів природного та техногенного походження. Електрохімічні покриття на основі тріади заліза, леговані тугоплавкими металами, підвищують корозійну тривалість, мікротвердість та зносостійкість поверхонь. Синтезовані методом плазмо-електролітного окиснення на сплавах алюмінію та титану гетерооксидні покриття, доповані перехідними металами, володіють каталітичними властивостями по нейтралізації токсичних речовин у газовій та рідкій фазах. Досліджено особливості електрохімічного формування функціональних покриттів на конструкційних матеріалах різного типу. Показано, що катодним осадженням постійним та імпульсним струмом на маловуглецевій сталі та сірому чавуні формуються рівномірні тернарні покриття Fe-Mo-W та композиційні системи Fe-Co-Mo (Fe-Co-W), що володіють підвищеною корозійною тривалістю та механічними показниками порівняно із матеріалом металу-основи. Одержані тонкошарові покриття рекомендовані для відновлення та зміцнення зношених поверхонь, зокрема в технологіях ремонту озброєння та військової техніки. Встановлено, що плазмо-електролітною обробкою поршневого силуміну у лужних розчинах на основі дифосфатів синтезовані гетерооксидні системи, що проявляють активність у зменшенні кількості токсичних викидів двигунів внутрішнього зоряння та зниження годинної витрати палива. Показано, що наноконкомпозитні покриття на титані проявляють фотокаталітичну активність по деструкції модельних забруднювальних агентів. Одержані матеріали володіють комплексом підвищених функціональних властивостей та є перспективними для застосування у промисловому та ремонтному виробництві сектору, в т.ч. для сектору безпеки і оборони.

Ключові слова: електрохімічне покриття; катодне осадження; плазмо-електролітне окиснення; наноконкомпозит; функціональні властивості

FUNCTIONAL ELECTROCHEMICAL COATINGS IN DUAL-USE TECHNOLOGIES

Н. KARAKURKCHI¹, М. SAKHNENKO², І. YERMOLENKO², S. INDYKOV²,
N. HOROKHIVSKA², V. SARAI¹

¹Military Institute of Armored Forces of National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

²Department of Physical Chemistry of National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Technological approaches to the application of functional electrochemical coatings in civil and military technologies are analyzed. It is shown that the existing technical solutions are aimed at solving the problems of strengthening and protection of surfaces and detoxification of environments from pollutants of natural and man-made origin. Electrochemical coatings based on the iron triad, doped with refractory metals, increase corrosion resistance, microhardness and wear resistance of surfaces. Doped with transition metals heteroxide coatings, which are synthesized by the method of plasma electrolytic oxidation on aluminum and titanium alloys have catalytic properties to neutralize toxic substances in the gas and liquid phases. Peculiarities of electrochemical formation of functional coatings on construction materials of different types are investigated. It is shown that cathodic deposition by direct and pulsed current on low-carbon steel and gray cast iron forms uniform ternary coatings of Fe-Mo-W and composite systems of Fe-Co-Mo (Fe-Co-W), which have increased corrosion resistance and mechanical properties compared to base metal material. The obtained thin-layer coatings are recommended for the restoration and strengthening of worn surfaces, in particular in the technology of repair of weapons and military equipment. It was found that plasma-electrolyte treatment of piston silumin in alkaline solutions based on diphosphates synthesized heteroxide systems that are active in reducing the number of toxic emissions of internal star engines and reducing hourly fuel consumption. It is shown that nanocomposite coatings on titanium show photocatalytic activity on the destruction of model pollutants. The obtained materials have a set of enhanced functional properties and are promising for use in industrial and repair production, including the security and defense sector.

Keywords: electrochemical coating; cathodic deposition; plasma electrolyte oxidation; nanocomposite; functional properties

Вступ

Розвиток техніки і модернізація обладнання у багатьох галузях промисловості (хімічна,

нафтопереробна, машино- і приладобудування) висувають підвищені вимоги до фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів та сплавів. Зокрема технології інженерії поверхні (surface

engineering) об'єднують сучасні та перспективні методи модифікації поверхні конструкційних матеріалів та сплавів, що дозволяє одержувати поліфункціональні покриття із широкою галуззю застосування [1–3].

У той же час, ринок військових та оборонних технологій висуває дуже високі вимоги до конструкційних матеріалів, що використовуються для виготовлення зразків бронетанкового озброєння та військової техніки в цілому, а також їх окремих деталей, вузлів та агрегатів [4,5]. Це обумовлено, насамперед, жорсткими умовами функціонування, інтенсивною експлуатацією, потребою у швидкому відновленні втрачених робочих функцій. Таким чином, затребуваними є технології модифікування поверхні, за яких на оброблюваній поверхні формується покриття із чітко визначеними властивостями. Сфера застосування покриттів різного функціонального призначення дуже широка: протикорозійний захист, підвищення міцності, електропровідності, тепло- та зносостійкості [6–8].

Крім того, одним із перспективних напрямів впровадження та застосування нанотехнологій у хімічному матеріалознавстві та хімічних технологіях є широке застосування каталітичних матеріалів [9,10]. Це сприяє створенню енерго-, ресурсо- та матеріалоощадних технологій, що покликані забезпечити енергетичну, економічну та екологічну безпеку держави. Особливо актуальними та затребуваними такі технології є для функціонування каталітичних конверторів подвійного призначення [11], що забезпечують знешкодження техногенних токсикантів та безпечні умови функціонування структур сектору безпеки і оборони, а також цивільного населення в зонах розміщення потенційно небезпечних об'єктів. Використання каталітичних процесів вимагає мінімального обладнання, що дозволяє їх автономне застосування на об'єктах без доступу до електрики. Слід зазначити, що технології поверхневої обробки із нанесенням тонкоплівкових покриттів, зокрема електрохімічних, досить поширені в оборонній промисловості США. Підприємствами-виробниками техніки військового та цивільного призначення використовується гальванічне нанесення покриттів індивідуальними металами (нікелем, хромом, кадмієм, сріблом, міддю, оловом), анодування алюмінію та його сплавів, хімічне осадження. Система стандартів міністерства оборони США (MIL-SPEC) чітко регламентує вимоги до процесу формування та властивостей (характеристик) одержаних покриттів [12].

Прикладом використання таких покриттів є програма армії США Smart Coatings™ [13]. Програмою передбачено проведення досліджень, спрямованих на розробку систем покриття для військової техніки, що включає в себе унікальні властивості, такі як саморемонт, вибіркоче видалення, стійкість до корозії, чутливість, здатність модифікувати фізичні властивості покриттів, зміна

забарвлення та попередження логістичного персоналу, коли цистерни або зброя потребують більш масштабного ремонту. При цьому також використовуються електрохімічні покриття, сформовані гальванічним методом або анодуванням [14,15].

Тому науковий та практичний інтерес до розробки поліфункціональних електрохімічних покриттів є вельми актуальним та обумовлений перспективами створення на їх основі високоефективних технологій, в тому числі подвійного призначення.

Мета та задачі роботи

Метою роботи є обґрунтування можливостей використання електрохімічних функціональних покриттів в технологіях подвійного призначення.

Для досягнення визначеної мети необхідно вирішити наступні задачі:

провести аналіз існуючих технологічних підходів до зміцнення і захисту поверхні, детоксикації середовищ від забруднювальних агентів;

визначити технологічні особливості електрохімічного формування функціональних покриттів на конструкційних матеріалах різного типу;

дослідити можливість електрохімічного синтезу функціональних покриттів на сталі, сірому чавуні, сплавах алюмінію та титану, визначити їх основні характеристики та надати рекомендації щодо галузей практичного застосування.

Матеріали і методи

Формування електрохімічних покриттів здійснювали на підкладках зі сталі 3 (Ст 3), сірого чавуну СЧ 18 та вентиляльних металів (алюмінію АЛ25 та титану ВТ1-0) (табл.1).

Таблиця 1 – Склад робочих електролітів для формування електрохімічних покриттів

Покриття	Метал-носіє	Електроліт	
		номер	склад, моль/дм ³
Fe-Mo-W	Ст 3, СЧ 18	№ 1	[16]
Fe-Co-Mo		№ 2	[17]
Fe-Co-W		№ 3	
Al ₂ O ₃ ·CoO _x	АЛ25	№ 4	0,1 K ₄ P ₂ O ₇ , 0,4 CoSO ₄
Al ₂ O ₃ ·MnO _y		№ 5	0,05 KOH, 0,005 KMnO ₄
TiO ₂ ·CuO·ZnO	ВТ1-0	№ 6	1,0 K ₄ P ₂ O ₇ , 0,5 оксидів (CuO, ZnO)

Лабораторна установка для формування покриттів включала: джерело постійного струму, електролітичну комірку із примусовим перемішуванням електроліту, робочі електроди, датчик температури. Для нанесення покриттів в імпульсному режимі в систему вводили потенціостат ПІ-50-1.1 з програматором ПР-8. Під час формування

гетерооксидних покриттів на сплавах алюмінію/титану додатково використовували систему охолодження електролітичної комірки та прилади контролю робочих параметрів процесу.

Процес проводили при температурі робочих розчинів 20-25°C. Поверхню зразків готували механічною обробкою, знежирюванням, травленням та промиваннями після кожної технологічної операції.

Характеристика режимів електрохімічного синтезу наведена у табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристика режимів формування функціональних покриттів

Покриття	Режим формування	Густина струму, А/дм ²
Fe-Mo-W	гальвано-	3,5...6,5
Fe-Co-Mo	статичний /	2,5...5,0
Fe-Co-W	імпульсний	4,0...5,5
Al ₂ O ₃ ·CoO _x	гальвано-	3,0...5,0
Al ₂ O ₃ ·MnO _y	статичний	15,0...20,0
TiO ₂ ·CuO·ZnO	(ПЕО)	4,0...5,0

Для дослідження морфологічних характеристик поверхні зразків використовували сканівний електронний мікроскоп ZEISS EVO 40XVP. SEM-фотографії поверхні отримували при збільшеннях 1000 та 2000 разів. Для обробки зображень використовували програмне середовище SmartSEM. Хімічний склад синтезованих покриттів досліджували за допомогою аналізу характеристичного рентгенівського спектру, який реєстрували за допомогою енерго-дисперсійного спектрометра INCA Energy 350. Збудження рентгенівського випромінювання здійснювали опроміненням зразків пучком електронів з енергією 15 кеВ. Топографію поверхні та шорсткість синтезованих покриттів визначали за допомогою сканівного атомно-силового зондового мікроскопу (АСМ) NT-206. Сканування проводили контактним методом з використанням зонду CSC-37, кантілеверу В з латеральною розподільною здатністю 3 нм. Площа сканування 5×5 мкм.

Виклад основного матеріалу

Покриття для зміцнення і захисту поверхні

Останнім часом значна увага в технологіях реновації, зміцнення і захисту поверхні розповсюджених конструкційних матеріалів (сталей та чавунів) приділяється процесам формування електрохімічних покриттів на основі тріади заліза, легованих додатковими компонентами [18,19]. Поєднання цінних властивостей сплавотвірних металів дозволяє одержувати покриття із підвищеними показниками корозійної тривкості, мікротвердості, зносостійкості на деталях із низьколегованої сталі та чавуну [20,21].

Авторами [22,23] запропоновані бінарні покриття сплавами Fe-Mo(W) і Fe-Cr із вмістом

легувальних компонентів на рівні 3...7 %. Для формування покриттів використовують сульфатні електроліти заліза(II) із добавками солей легувальних компонентів. Одержані покриття характеризуються підвищеними механічними властивостями та можуть використовуватись, зокрема, для зміцнення і відновлення клапанів та наконечників рульових тяг, а також у ремонтному виробництві. Слід зауважити, що можливість осаджувати у вигляді компонентів сплавів такі тугоплавкі метали, як вольфрам та молібден, викликає особливий практичний інтерес оскільки у чистому вигляді вони не можуть бути осаджені із водних розчинів, проте володіють цінними функціональними властивостями та можуть значно покращити якість більш дешевих та доступних матеріалів. Роботи по електроосадженню багатокомпонентних покриттів сплавами Мо і W з металами підгрупи заліза інтенсивно проводились під керівництвом Е. J. Podlaha [24-26]. Для формування покриттів Ni-Fe-Mo-W дослідники пропонують комплексний цитратний електроліт на основі сульфату нікелю з додаванням молібдату та вольфрамату натрію та боратної кислоти й сульфату заліза(II). Проте одержані покриття містять незначну кількість легувальних тугоплавких компонентів (до 8,0 мас.%), а їх поверхня є нерівномірною, з великою кількістю утворень неправильної форми та тріщин. У роботах [27, 28] наведені результати досліджень щодо формування тернарних сплавів заліза і кобальту з тугоплавкими компонентами. Для одержання покриттів Fe-Co-Mo та Fe-Co-W використовувались цитратні електроліти заліза(III). зазначається, що формувати покриття можна як в режимі постійного струму, так і нестационарним електролізом. Проте доцільність застосування нестационарних режимів електролізу при електроосадженні тернарних синергетичних сплавів підгрупи заліза з Мо і W підтверджується дослідженнями [29,30].

Отримані результати показують, що ефективним інструментом управління складом і морфологією, а отже, і властивостями покриттів є концентрації сплавотвірних компонентів в електроліті і густина струму обробки.

Каталітичні системи детоксикації забруднювальних агентів

Застосування сплавів алюмінію (титану) достатньо поширене на сьогодні та має значні перспективи подальшого розвитку. Ці сплави використовуються в транспортному та хімічному машинобудуванні, автомобільній промисловості, в авіації, ракетно-космічній та атомній техніці, в будівництві [31,32], тощо. Важливим напрямом є використання цих матеріалів як носіїв каталітичних систем та каталізаторів для нейтралізації токсичних речовин у газовій та рідкій фазах [33,34].

Зокрема, підвищення робочих характеристик та модифікування робочої поверхні деталей ДВЗ із поршневих силумінів можна здійснювати шляхом нанесення функціональних покриттів з нанесенням

гальванічного покриття, лазерним легуванням (наплавленням), осадженням із газової фази, а також плазмовим та плазмово-дуговим напилюванням [35–37]. Проте, наразі означені технології не досить поширені через значну собівартість реалізації та технологічну складність.

Ефективним способом формування покриттів цільового призначення на вентильних металах (в т.ч. сплавах алюмінію та титану) є плазмо-електролітне оксидування (ПЕО). Особливість ПЕО у порівнянні із класичним анодуванням полягає в оксидуванні поверхні у водних розчинах електролітів за високої напруги під дією короткотермінових електричних розрядів [38,39]. У таких високоенергетичних режимах за рахунок реалізації електрохімічних та термохімічних реакцій відбувається формування високорозвиненої оксидної матриці основного металу з інкорпорованими сполуками або переплавами компонентів електроліту [40]. Саме технологію ПЕО можна розглядати як ефективний спосіб обробки деталей поршневих двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) із алюмінієвих сплавів (силумінів) [41]. Перевагами даного електрохімічного способу є простота технологічного обладнання, нетоксичність робочих розчинів, відсутність етапу попередньої підготовки деталей, можливість ефективно обробки складно-профільованих та великогабаритних виробів.

Синтезовані в такий спосіб гетерооксидні системи мають високу каталітичну активність за рахунок поверхневої неоднорідності хімічного складу, наприклад, відхилення від стехіометрії, інкорпорації домішок з диференцьованими донорно-акцепторними властивостями, а також поверхневої локалізації хімічних сполук різної природи [42]. При цьому вони тривалий час зберігають працездатність в умовах дії високих температур і тиску, що загалом притаманно процесам нейтралізації токсичних компонентів [43]. Високі показники корозійної стійкості, механічної міцності і здатність до регенерації забезпечують тривалий термін експлуатації каталітичних матеріалів даного типу [44].

Можливість електрохімічного синтезу функціональних покриттів на прикладі деталей поршневої групи ДВЗ наведено у дослідженнях [45–50]. У роботі [45] надано результати досліджень щодо використання технології ПЕО для зміцнення робочих поверхонь блоку циліндрів ДВЗ. Показано технологічну можливість реалізації ПЕО великогабаритних відливок силумінів з одержанням якісного оксидного шару. Авторами [46] досліджено можливість та перспективи використання технології ПЕО для ремонту та відновлення геометрії робочих поверхонь деталей двигунів із силумінів. В роботі [47] наведено результати експериментальних досліджень щодо зміцнення поверхні поршня ASP80 зі сплаву АК12 методом ПЕО у лужно-силікатному електроліті. Під час стендових випробувань встановлено, що інтенсивність зношування поршня з нанесеним покриттям зменшується у 2,5 рази. Авторами [48]

встановлено зниження шляхової та транспортної витрати палива на 5–7% під час використання ПЕО-покриттів на поршнях ДВЗ порівняно із типовими поршнями двигуна. У роботах [49,50] експериментально підтверджено підвищення ефективності та економічності ДВЗ при використанні поршнів з теплоізоляційним покриттям оксиду алюмінію, який одержують гальвано-плазмовою обробкою штатних поршнів двигунів.

Перспективним напрямом застосування ПЕО є формування фотокаталітичних покриттів на сплавах титану [51]. Введення в оксидну матрицю TiO_2 оксидів перехідних та тугоплавких металів прогнозовано дозволить підвищити активність таких гетерооксидних систем [52,53]. У підсумку це дозволить використати синтезовані поліфункціональні покриття як основу для безреагентного очищення газових та водних середовищ від токсичних агентів.

Таким чином, проведений аналіз дає змогу зробити висновок, що спосіб синтезу електрохімічних покриттів залежить від типу оброблюваного матеріалу, а функціональні властивості покриттів – від технологічних параметрів процесу формування.

У попередніх дослідженнях авторами вже досягнуті певні позитивні результати щодо формування покриттів багатокомпонентними сплавами [54,55], а також гетерооксидних покриттів та нанокомпозитів на сплавах титану [56,57] та алюмінію [58,59]. За результатами досліджень обґрунтовано вибір оптимальних складів електролітів та режимів електролізу для одержання покриттів із високим вмістом допантив. Одержані результати ґрунтуються на багаторічному досвіді авторів щодо електрохімічного дизайну та технологій поліфункціональних покриттів, починаючи з селекції компонентів, через системні дослідження кінетичних закономірностей і виявлення механізму процесів, до розробки технологічних регламентів і проведення дослідно-промислових випробувань.

Наявний масив науково-практичних результатів є підґрунтям для подальших досліджень, спрямованих на розвиток технологічних підходів до електрохімічного синтезу функціональних покриттів, що сприятиме розробці нових й перспективних технічних рішень в галузі хімічних технологій для потреб сектору безпеки і оборони.

Обговорення результатів

Аналіз результатів проведених експериментальних досліджень свідчить про можливість ефективного формування тонкоплівкових поліфункціональних покриттів на розповсюджених конструкційних матеріалах.

Електрохімічні покриття для зміцнення і захисту поверхні нелегованої сталі та сірого чавуну.

Сформовані на Ст 3 та СЧ 18 покриття Fe-Mo-W не мають тріщин та є рівномірними по всій площі

оброблених зразків. Поверхня синтезованих покриттів складається з агломератів зерен сферичної форми (рис. 1, а), що можна пояснити включенням вольфраму до їхнього складу. Сумарний вміст тугоплавких компонентів у поверхневих шарах складає 35–37 ат. % (у перерахунку на метал).

При формуванні покриттів сплавом Fe-Co-W встановлено конкурентне осадження заліза з кобальтом і вольфрамом. Вказаних режимах електролізу можливе одержання покриттів із низькою поруватістю, рівномірним розподілом елементів по поверхні, вмістом W до 6 – 12 ат. % і кобальту до 32 – 47 ат. %. Морфологія поверхні покриттів Fe-Co-W є мікроглобулярною та утворена агломератами зерен сферичної форми розміром до 1 мкм (рис. 1, б).

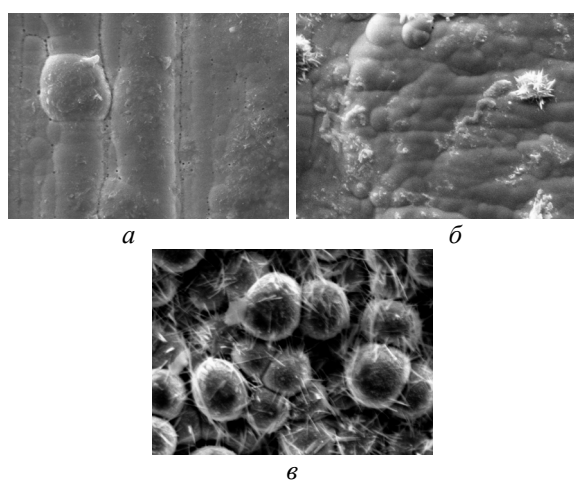


Рис. 1 – СЕМ-зображення покриттів багатокомпонентними сплавами заліза та кобальту з тугоплавкими компонентами: а – Fe-Mo-W, б – Fe-Co-W, в – Fe-Co-Mo. Збільшення $\times 2000$.

Конкурентне співосадження Co з Mo при формуванні сплаву Fe-Co-Mo віддзеркалюється збагаченням покриття кобальтом за рахунок молібдену при збільшенні концентрації компонентів електроліту. Вміст молібдену у сформованих покриттях може сягати 15 – 31 ат. % при концентрації Co на рівні 26 – 48 ат. %. Морфологія покриттів Fe-Co-Mo змінюється від дрібнокристалічної до глобулярної з підвищенням густини катодного струму під час електролізу (рис. 1, в). Синтезоване покриття характеризується макронеоднорідністю, про що свідчить істотна відмінність вмісту компонентів на виступах та упадинах. Перехід до імпульсного струму електрохімічного синтезу дозволяє одержувати більш рівномірний розподіл легувальних компонентів у поверхневих шарах сформованих покриттів.

Тернарні покриття Fe та Co з Mo і W можна розглядати як композиційні, що містять зміцнювальну фазу оксидів тугоплавких металів, тобто мають демонструвати підвищену поверхневу міцність і твердість. Наявність на поверхні кислотних оксидів з високою хімічною стійкістю сприятиме підвищенню корозійного опору матеріалів та прояву каталітичної

активності у гетерогенних окисно-відновних реакціях за участю кисню. Це підтверджується результатами експериментальних досліджень вказаних властивостей. Визначено, що за глибинним показником корозії запропоновані тернарні покриття відносяться до класу «стійких» у кислому середовищі та «вельми стійких» у нейтральному та лужному середовищах. Одержані покриття сплавами Fe-Mo-W, Fe-Co-W і Fe-Co-Mo мають високу адгезію до матеріалу основи та зберігають її за механічних навантажень. Зазначені тернарні покриття за показниками мікротвердості у 2,5 – 3,5 рази перевершують матеріал підкладки (Ст 3, СЧ 18). Сплави Fe-Co-W і Fe-Co-Mo також демонструють магнітні властивості за рахунок присутності у їх складі кобальту.

Покриття Fe-Mo-W були використані для відновлення зношеної чавунної колодки (рис. 2) з наступним тестуванням антифрикційних властивостей (коефіцієнта тертя) одержаної поверхні.

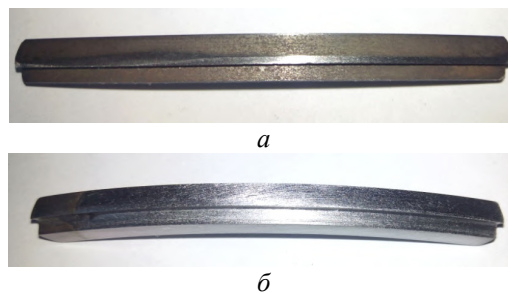


Рис. 2 – Колодка із чавуну СЧ18 без покриття (а) та колодка з покриттям Fe-Mo-W (б)

Дослідження на серійній машині 2070 СМТ-1 при ступеневому навантаженні спряжених зразків від 0,2 кН до 0,8 кН за схемою «диск – колодка» довели, що коефіцієнт тертя для відновленої поверхні у 3–4 рази нижчий, ніж для основного металу (СЧ 18).

Таким чином, за сукупністю фізико-механічних та експлуатаційних властивостей електрохімічні покриття сплавами заліза з кобальтом та тугоплавкими металами можуть бути рекомендовані для ефективного відновлення та зміцнення зношених поверхонь з маловуглецевої сталі та чавуну у технологіях ремонту бронетанкового озброєння та військової техніки [60].

Одним з найбільш проблемних місць розробленого технологічного підходу є вплив матеріалу підкладки (матеріалу-носія) на процес електроосадження. Це пов'язано з тим, що для електрохімічних покриттів ключовими факторами, які визначають їх якість, є рівномірність нанесення і міцність зчеплення з основним металом. Наявність забруднень і неоднорідностей поверхні оброблюваного матеріалу істотно знижує адгезійні характеристики сформованих електрохімічних покриттів, може бути причиною їх здуття та відшарування. Тому в процесі підготовки поверхні матеріалу перед формуванням електрохімічних

покриттів особлива увага приділяється видаленню технічних і жирових забруднень, продуктів корозії і м'якому травленню (освітленню).

Каталітичні плазмо-електролітні покриття для зниження токсичних викидів ДВЗ

Плазмо-електролітним оксидуванням високоремністого силуміну АЛ 25 у лужних розчинах електролітів 4 та 5 (табл. 1) на зразках зазначеного поршневого сплаву одержано рівномірні оксидні покриття із вмістом перехідних металів (кобальту або мангану). Послідовним оксидуванням в означених електролітах можна одержати змішаний гетерооксидний шар оксидів мангану та кобальту [61].

Морфологія поверхні змішаних гетерооксидних покриттів змінюється з інкорпорацією металів-допантів до матриці оксиду алюмінію. Включення кобальту відбувається у вигляді сфероїдних острівкових структур синьо-фіолетового кольору. В процесі оксидування такі мозаїчні структури рівномірно вкривають всю поверхню зразка. Вміст кобальту в поверхневих оксидних шарах сягає 24 ат. % (рис. 3, а).

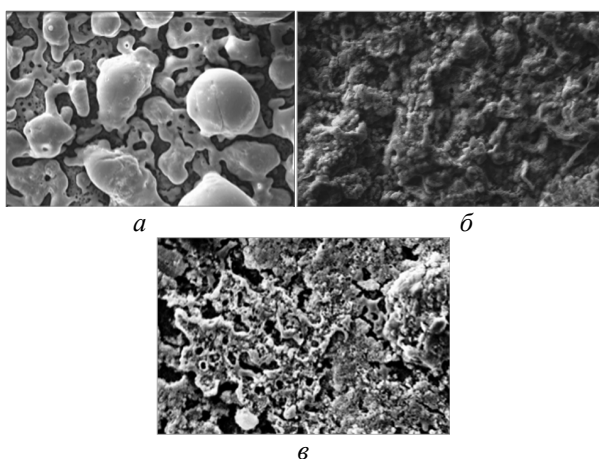


Рис. 3 – СЕМ-зображення гетерооксидних покриттів на АК12М2М2Н: а – Al / Al₂O₃·CoO_x, б – Al / Al₂O₃·MnO_y, в – Al / Al₂O₃·CoO_x, MnO_y. Збільшення × 1000.

ПЕО силуміну у манганвмісному лужному електроліті забезпечує формування рівномірного коричнево-чорного гетрооксидного шару із вмістом мангану до 35 ат.%. Поверхня покриття є мікроглобулярною, на ній візуалізовано значну кількість конгломератів, утворених дрібними сфероїдами (рис. 3, б). Двостадійне оксидування з формуванням шару змішаних оксидів кобальту та мангану дозволяє одержати дрібнодисперсне порувате покриття. Сумарний вміст допантів у складі поверхневих шарів сягає 25-30 ат. % (рис. 3, в). Наведений аналіз хімічного складу сформованих гетерооксидних покриттів доводить ефективність ПЕО-обробки поршневого силуміну щодо зниження вміст кремнію у поверхневих шарах до 3 ат. %, що є однією із вимог до високої каталітичної активності модифікованої поверхні.

Одержані гетерооксидні покриття мають високий ступінь розвинення поверхні (рис. 4), що підтверджено результатами дослідження топографії поверхневих шарів із використанням атомно-силової мікроскопії.

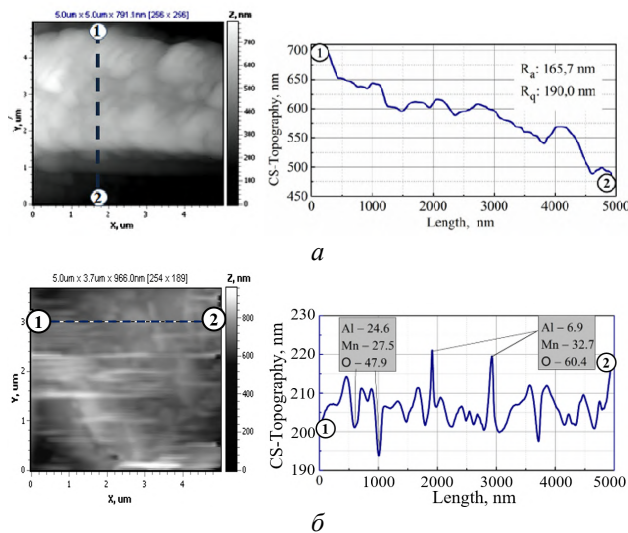


Рис. 4 – 2D-карти поверхні та профіль перетину поверхні між маркерами 1 та 2 покриття: Al/Al₂O₃, CoO_x (а); Al/Al₂O₃, MnO_y (б). Площа сканування 5×5 мкм.

У поєднанні із значним вмістом допантів у складі гетерооксидного покриття рівномірно-глобулярний характер і висока ступінь розвинення поверхні є передумовами високої каталітичної активності одержаних систем [62].

Результати апробації розробленої технології для ПЕО поршнів ДВЗ зразків озброєння та військової техніки, що стоїть на озброєнні Збройних Сил України та інших структур сектору безпеки і оборони, засвідчили можливість її використання для зниження кількості токсичних викидів (CO, NO_x) на 10–15 % зниження годинної витрати палива до 4–6 % для кожної одиниці техніки [63].

Розроблені покриття можуть знайти застосування в технологіях внутрішньоциліндрового каталізу з метою зниження токсичності викидів двигунів та підвищення їх паливної економічності.

Фотокаталітичні наноконкомпозити для детоксикації забруднювальних агентів

Плазмо-електролітним оксидуванням на сплав титану ВТ1-0 сформовані рівномірні покриття TiO₂·CuO·ZnO (рис. 5), що мають високу адгезію до оброблюваного сплаву.

Варіювання складу робочих електролітів та режимів ПЕО забезпечують гнучке керування морфологією поверхневих шарів та складом синтезованих покриттів, що впливатиме на їх функціональні властивості [64], зокрема активність у деструкції модельних токсичних агентів.

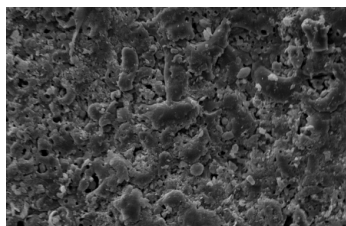


Рис. 5 – СЕМ-зображення нанокompозиту $TiO_2-CuO-ZnO$, сформованого у режимі ПЕО на сплаві титану ВТІ-0

Встановлено, що ступінь розкладання азобарвника метилового жовтогогарячого під дією ультрафіолетового випромінювання складає 75–85%, що свідчить про наявність фотокаталітичних властивостей у синтезованих нанокompозитних покриттів.

Таким чином, під час досліджень встановлено, що матеріал металу-носія (оброблюваного сплаву), склад робочого електроліту та режим електрохімічного синтезу впливають як на особливості реалізації технологічного процесу одержання функціонального матеріалу, так і на склад та властивості синтезованих електрохімічних покриттів [65]. Практична цінність одержаних результатів полягає в їх застосуванні при створенні широкого спектру *smart*-матеріалів для екокаталізу, хімічної енергетики та автотранспортної галузі.

Загалом для визначення оптимальних умов синтезу електрохімічних покриттів та тестування властивостей одержаних функціональних матеріалів доцільно використовувати кортеж «умови синтезу → склад → структура → властивості», що у сукупності буде визначати складати базис подальших досліджень щодо розробки функціональних матеріалів.

Висновки

Проведено аналіз наявних технологічних підходів до зміцнення і захисту поверхні та детоксикації середовищ від забруднювальних агентів із використанням електрохімічних покриттів.

Визначено технологічні особливості електрохімічного формування функціональних покриттів на конструкційних матеріалах різного типу.

Встановлено, що сформовані катодним осадженням тернарні покриття Fe-Mo-W та композиційні системи Fe-Co-Mo (Fe-Co-W), підвищують корозійну тривкість, мікротвердість та зносостійкість поверхонь із маловуглецевої сталі та сірого чавуну. В той же час плазмо-електролітним оксидуванням на сплавах алюмінію та титану одержані гетерооксидні покриття та нанокompозити, що володіють каталітичними властивостями по нейтралізації токсичних речовин у газовій та рідкій фазах.

Доведено, що матеріал оброблюваного сплаву, склад робочого електроліту та режим

електрохімічного синтезу впливають на особливості реалізації технологічного процесу одержання функціонального матеріалу, а також на склад та властивості синтезованих електрохімічних систем. Одержані функціональні покриття можуть бути використані при створенні *smart*-матеріалів для екокаталізу, хімічної енергетики та автотранспортної галузі.

Список літератури

1. Суслов А. Г., Безъязычный В. Ф., Панфилов Ю. В., Бишутин С. Г. *Инженерия поверхности деталей: монография*. Москва: Машиностроение, 2008. 320 с.
2. Токарева И. А., Байрачный Б. И. Наноструктурированные анодные оксидные покрытия на вентильных металлах – задачи и возможности. *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии: Сборник научных работ*. 2017. Т. 15, № 4. С. 713–740.
3. Dearnly P. A. *Introduction to Surface Engineering*. Cambridge University Press, 2017. 325 p.
4. Fedyk I. Certified by battle. Ukrainian's armored vehicles in the combat actions in Donbass. *Ukrainian Defense Review*. 2017. № 1. С. 18–21.
5. Гуляев А. В. Адаптація системи технічного обслуговування і ремонту озброєння та військової техніки до нового вигляду Збройних Сил України. *Системи озброєння і військова техніка*. 2012. № 4 (32). С. 18–21.
6. Yar-Mukhamedova G. Sh., Sakhnenko N. D., Ved M. V. *Nanocomposite electrolytic coatings with defined functional properties*. Almaty: Kazakh University, 2020. 180 p.
7. Rudnev V. S. Multiphase Anodic Layers and Prospects of Their Application. *Prot. Met.* 2008. Vol. 44. No 3. P. 263–272. doi:10.1134/S0033173208030089.
8. Rudnev V. S., Lukiyanchuk I. V., Vasilyeva M. S., Medkov M. A., Adigamova M. V., Sergienko V. I. Aluminum- and titanium-supported plasma electrolytic multicomponent coatings with magnetic, catalytic, biocide or biocompatible properties. *Surf. Coat. Technol.* 2016. Vol. 307, Part C, 1219–1235. doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.060.
9. Grison C., Escande V., Biton J. *Ecocatalysis. A New Integrated Approach to Scientific Ecology*. Elsevier, 2015. 100 p.
10. Kašpar J., Fornasiero P., Hickey N. Automotive catalytic converters: current status and some perspectives. *Catal. Today*. 2003. Vol. 77. Iss. 4. P. 419–449. doi:10.1016/S0920-5861(02)00384-X.
11. Галак О. В., Каракуркчі Г. В., Грибинюк Я. В. Фільтровентиляційні установки (агрегати) стаціонарні та на бронеоб'єктах. *Системи озброєння та військова техніка*. 2016. № 4(48). С. 5–9.
12. Finishes, coatings, and sealants, for the protection of aerospace weapons systems. MIL-STD-7 179. Department of defense standard practice, 1997. 27 p.
13. Zunino J., Battista L., Colon N. U.S. Army Development of Active Smart Coatings™ System for Military Vehicles. *NSTI-Nanotech*. 2005. Vol. 3. P. 387–390.
14. Hamdy Makhlof A. S. *Handbook of Smart Coatings for Materials Protection*. Woodhead Publishing, 2014. 656 p.
15. Anodic coatings for aluminum and aluminum alloys. MIL-A-8625F, 2003. 25 p.
16. Ved M. V., Sakhnenko N. D., Karakurkchi A. V., Yermolenko I. Yu. Electroplating and functional properties

- of Fe-Mo and Fe-Mo-W coatings. *Iss. Chem. Chem. Technol.* 2014. No. 5–6 (98). P. 53–60.
17. Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Yermolenko I. Y., Nenastina T. A. Nanostructured Functional Coatings of Iron Family Metals with Refractory Elements. *Nanochemistry, Biotechnology, Nanomaterials, and Their Applications. NANO 2017*. 2018. Vol. 214. P. 3–34. doi:10.1007/978-3-319-92567-7_1.
18. Yapontseva Y. S., Dikuser A. I., Kyblanovskii V.S. Study of the composition, corrosion, and catalytic properties of Co-W alloys electrodeposited from a citrate pyrophosphate electrolyte. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2014. No. 50. P. 330–336. doi:10.3103/S1068375514040139.
19. Silkin S., Gotelyak A., Tsyntaru N., Dikuser A. Size effect of microhardness of nanocrystalline Co-Wcoatings produced from citrate and gluconate solutions. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2015. Vol. 51. P. 228–234. doi:10.3103/S106837551503014X.
20. Tsyntaru N., Dikuser A., Cesiulis H., Celis J.-P., Bobanova Zh., Sidel'nikova S., Belevskii S., Yapontseva Yu., Bersirova O., Kublanovskii V. Tribological and corrosive characteristics of electrochemical coatings based on cobalt and iron superalloys. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2009. Vol. 48. No. 7–8. P. 419–428. doi:10.1007/s11106-009-9150-7.
21. Bobanova Zh. I., Dikuser A. I., Cesiulis H., Tsyntaru N. I., Prosycevas I. Micromechanical and tribological properties of nanocrystalline coatings electrodeposited from citrate-ammonia solutions. *Russ. J. Electrochem.* Vol. 45. No. 8. P. 895–901. doi:10.1134/S1023193509080096.
22. Летов С. С., Серебровский В. В., Афанасьев Е. А. Применение электроосажденных бинарных покрытий на основе железа для упрочнения и восстановления деталей машин. *Инструмент и технологии*. 2012. № 2. С. 26–32.
23. Гадалов В. Н., Серебровский В. И., Скрипина Ю. В. Реновация машиностроительной и сельскохозяйственной техники гальваническими железохромистыми покрытиями с применением цементации. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2012. № 1–2. С. 90–94.
24. Tsyntaru N., Cesiulis H., Donten M., Sort J., Pellicer E., Podlaha-Murphy E. J. Modern Trends in Tungsten Alloys Electrodeposition with Iron Group Metals. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2012. Vol. 48. No. 6. P. 491–520. doi:10.3103/S1068375512060038.
25. Podlaha E. J., Landolt D. Induced codeposition: III. Molybdenum alloys with nickel, cobalt and iron. *J. Electrochem. Soc.* 1997. Vol. 144. No. 5. P. 1672–1680.
26. Podlaha-Murphy E. J. Electrodeposition of Ni-Fe-Mo-W Alloys. 1st Quarterly Report January-March, 2013. *NASF Surf. Technol. White Papers*. 2013. Vol. 77. 12. P. 11-17.
27. Sun S., Bairachna T., Podlaha E. J. Induced Codeposition Behavior of Electrodeposited NiMoW Alloys. *J. Electrochem. Soc.* 2013. Vol. 160. No. 10. P. 434–440.
28. Silva M., Kola A., Duarte K., Sun S., Podlaha E. J. Plating of NiW, NiMo and NiMoW with and without Fe: Induced codeposition mechanism. *National Association for Surface Finishing Annual Conference and Trade Show, SUR/FIN 2014*. 2014. Vol. 1. P. 575–596.
29. Yermolenko I. Yu., Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Sachanova Y. I. Composition, Morphology, and Topography of Galvanic Coatings Fe-Co-W and Fe-Co-Mo. *Nanosc. Res. Lett.* 2017. Vol. 12. P. 352. doi:10.1186/s11671-017-2128-3.
30. Сахненко М., Ведь М., Каракурчі Г., Єрмоленко І., Зюбанова С. Ресурсозаощаджувальна технологія відновлення зношених деталей. *Інтегровані технології та ресурсозбереження*. 2013. № 2. С. 9–13.
31. Okada A. *Innovative materials for automotive industry*. New York: Nova Science Publishers, 2010. 147 p.
32. Glazoff M. V., Zolotarevsky V. S., Belov N. A. *Casting Aluminum Alloys*. Elsevier, Oxford, 2007. 544 p.
33. Lukiyanchuk I. V., Rudnev V. S., Tyrina L. M. Plasma electrolytic oxide layers as promising systems for catalysis. *Surf. Coat. Technol.* 2016. Vol. 307. Part C. P. 1183–1193.
34. Karakurkchi A. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Gorohivskiy A. S., Galak O. V., Menshov S. M., Matykin O. V. Cobalt and manganese oxide catalytic systems on valve metals in ecotechnologies. *Prot. Mater. Proc. Appl. Electrochem.*: monogr. Kyiv : KNUTD, 2017. P. 214–223.
35. Колмыков Д. В., Гончаров А. Н. Комбинированные методы упрочнения. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2012. Вип. 6 (24). С. 46–50.
36. Мазуренко Є. А., Герасимчук А. І., Овсянников В. П. Хімічне осадження з газової фази, синтез функціональних матеріалів (огляд). *Фізика і хімія твердого тіла*. 2001. Т.2. № 3. С. 339–349.
37. Bobzin K., Ernst F., Richardt K., Schlaefel T., Verpoort C., Flores G. Thermal spraying of cylinder bores with the Plasma Transferred Wire Arc process. *Surf. Coat. Technol.* 2008. Vol. 202. No. 18. P. 4438–4443. doi:10.1016/j.surfcoat.2008.04.023.
38. Jiang B. L., Wang Y. M. Plasma electrolytic oxidation treatment of aluminium and titanium alloys. *Surf. Engin. light alloys*. 2010. P. 110–154. doi:10.1533/9781845699451.2.110.
39. Gupta P., Tenhundfeld G., Daigle E. O., Ryabkov D. Electrolytic plasma technology: Science and engineering – An overview. *Surf. Coat. Technol.* 2007. Vol. 201, Iss. 21. P. 8746–8760. doi:10.1016/j.surfcoat.2006.11.023.
40. Сахненко М. Д., Ведь М. В., Каракурчі Г. В., Галак О. В. Особливості одержання металоксидних каталітичних систем плазмово-електролітичним окисдуванням алюмінію та титану в пірофосфатних електролітах. *Вісник НТУ «ХПІ»*. № 22(1194). С. 171–176.
41. Dudareva N. Yu., Abramova M. M. The Structure of Plasma Electrolytic Coating Formed on Al-Si alloys by the Micro Arc Oxidation Method. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2016. Vol. 52, No. 1. P. 128–132. doi:10.1134/S2070205116010093.
42. Burange A. S., Gawande M. B. Role of Mixed Metal Oxides in Heterogeneous Catalysis. *Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry*. 2016. P. 1–19.
43. Korotcenkov Gh. *Metal Oxides in Heterogeneous Catalysis*. 2018. 618 p.
44. Sulka G. *Nanostructured Anodic Metal Oxides*. Elsevier, 2020. 484 p.
45. Криштал М. М., Ясников И. С., Ивашин П. В., Полуниин А. В. О применении технологии микродугового окисирования для ремонта и восстановления изделий из силуминов. *Авиационная и ракетно-космическая техника*. 2012. № 3 (34). С. 225–228.
46. Krishtal M. M. Oxide Layer Formation by Micro-Arc Oxidation on Structurally Modified Al-Si Alloys and Applications for Large-Sized Articles Manufacturing. *Adv. Mater. Research*. 2009. Vol. 59. P. 204–208. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.59.204.
47. Бутусов И. А., Дударева Н. Ю. Исследование влияния микродугового окисирования на износостойкость поршня ДВС. *Наука и образование*. 2013. 9. С. 127-144.
48. Степанов В. А. Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей микродуговым

- оксидированием днищ поршней двигателей. *Science and world*. 2014. № 1 (5). С. 115–117.
49. Марченко А. П., Шпаковский В. В., Пильов В. В. Підвищення економічності бензинового двигуна на різних режимах роботи при застосуванні частково-динамічної теплоізоляції поршнів. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2013. № 32 (1005). С. 106–110.
50. Марченко А. П., Шпаковский В. В. Влияние корундового слоя на рабочих поверхностях поршней на процесс сгорания в ДВС. *Двигатели внутреннего сгорания*. 2011. № 2. С. 24–28.
51. Sakhnenko M., Karakurkchi A., Galak A., Menshov S., Matykin O. Examining the formation and properties of TiO₂ oxide coatings with metals of iron triad. *East-Europ. J. Enterpr. Technol.* 2017. Vol. 2. No 11(86). P. 4–10. doi:10.15587/1729-4061.2017.97550.
52. Khairy M., Zakaria W. Effect of metal-doping of TiO₂ nanoparticles on their photocatalytic activities toward removal of organic dyes. *Egyptian J. of Petroleum*. 2014. Vol. 23. P. 419–426.
53. DohLeviE-MitroviE Z., DohLeviE-MitroviE Z., Stojadinovi E S., Lozzi L., Aškrabi E S., RosiE M., TomiE N., PaunoviE N., LazoviE S., NikoliE M. G., Santucci S. WO₃/TiO₂ composite coatings: Structural, optical and photocatalytic properties. *Mater. Res. Bull.* 2016. Vol. 83. P. 217–224. doi:10.1016/j.materresbull.2016.06.011.
54. Yar-Mukhamedova G., Ved' M., Sakhnenko N., Koziar M. Ternary cobalt-molybdenum-zirconium coatings for alternative energies. *Appl. Surf. Sci.* 2017. Vol. 421. Part A. P. 68–76. doi:10.1016/j.apsusc.2017.01.196.
55. Ermolenko I. Yu., Sakhnenko N. D., Zyubanov S. I., Sachanova Yu. I. Methods for controlling the composition and morphology of electrodeposited Fe–Mo and Fe–Co–Mo coatings. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2017. Vol. 53. No. 6. P. 525–532. doi: 10.3103/S1068375517060138.
56. Сахненко Н. Д., Ведь М. В., Майба М. В. *Конверсионные и композиционные покрытия на сплавах титана: монография*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. 176 с.
57. Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Karakurkchi A. V. Effect of Doping Metals on the Structure of PEO Coatings on Titanium. *Intern. J. Chem. Engin.* 2018. Vol. 2018. Article ID 4608485, 10 p. doi: 10.1155/2018/4608485.
58. Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Karakurkchi A. V., Gorohivskiy A.S. Synthesis of catalytic cobalt-containing coatings on alloy AL25 surface by plasma electrolytic oxidation. *Chemistry, Physics and Technology of Surface*. 2017. Vol. 8. No. 1. P. 73–79.
59. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Luhovskyi I. S., Drobakha H. A., Mayba M. V. Features of plasma electrolytic formation of manganese- and cobalt-containing composites on aluminum alloys. *Adv. Mater. Sci. Engin.* 2019. Vol. 2019. Article ID 6381291, 13 p. doi:10.1155/2019/6381291.
60. Каракуркчі Г. В., Ведь М. В., Єрмоленко І. Ю., Сахненко М. Д. *Електролітичні покриття сплавами заліза для зміцнення і захисту поверхні*. Харків: ФОП Панов, 2017. 200 с.
61. Karakurkchi A., Sakhnenko M., Ved' M., Yermolenko I., Pavlenko S., Yevsieiev V., Pavlov Y., Yemanov V. Determining features of application of functional electrochemical coatings in technologies of surface treatment. *East-Europ. J. Enterpr. Technol.* 2019. Vol. 3, No. 12 (99). P. 29–38. doi:10.15587/1729-4061.2019.171787.
62. Method of formation of oxide nanodisperse coatings on aluminium alloys: pat. 4978 Republic of Kazakhstan, C25D 3/12, C25D 11/02, C25D 11/04, C25D 11/06. 2019/1012.2; declar. 18.11.2019, publ. 29.05.2020, Bul. № 21.
63. Parsadanov I. V., Sakhnenko M. D., Khyzhnyak V. O., Karakurkchi H. V. Improving the environmental performance of engines by intra-cylinder neutralization of toxic exhaust gases. *Internal Combustion Engines*. 2016, Vol. 2. P. 63–67. doi: 10.20998/0419-8719.2016.2.12.
64. Low J., Yu J., Jaroniec M., Wageh S., Al-Ghamdi A. A. Heterojunction Photocatalysts. *Adv. Mater.* 2017. Vol. 29. 1601694. doi:10.1002/adma.201601694.
65. Wong Y. H., Affendy M. G., Lau S. K. Effects of anodisation parameters on thin film properties: a review. *Mater. Sci. Technol.* 2017. No. 33. P. 699–711. doi:10.1080/02670836.2016.1193654.

References (transliterated)

1. Suslov A. G., Bez'yazyichnyiy V. F., Panfilov Yu. V., Bishutin S. G. *Inzheneriya poverhnosti detaley: monografiya [Engineering of parts surfaces]*. Moscow, Mashinostroenie, 2008, 320 p.
2. Tokareva I. A., Bayrachnyiy B. I. Nanostrukturirovannyye anodnyie oksidnyie pokryitiya na ventilnyih metallah – zadachi i vozmozhnosti [Nanostructured anodic oxide coatings on valve metals – challenges and opportunities]. *Nanosystemy, nanomaterialy, nanotekhnolohiyi: Zbirnyk naukovykh prats'*, 2017, Vol. 15, no. 4, pp. 713–740.
3. Dearnly P. A. *Introduction to Surface Engineering*. Cambridge University Press, 2017, 325 p.
4. Fedyk I. Certified by battle. Ukrainian's armored vehicles in the combat actions in Donbass. *Ukrainian Defense Review*, 2017, no. 1, pp. 18–21.
5. Hulyayev A. V. Adaptatsiya systemy tekhnichnoho obsluhovuvannya i remontu ozbroyennya ta viys'kovoyi tekhniki do novoho vyhlyadu Zbroynykh Syl Ukrainy [Adaptation of the system of maintenance and repair of armaments and military equipment to the new type of the Armed Forces of Ukraine]. *Systemy ozbroyennya i viys'kova tekhnika*. 2012. no. 4 (32). pp. 18–21.
6. Yar-Mukhamedova G. Sh., Sakhnenko N. D., Ved M. V. *Nanocomposite electrolytic coatings with defined functional properties*. Almaty: Kazakh University, 2020, 180 p.
7. Rudnev V. S. Multiphase Anodic Layers and Prospects of Their Application. *Prot. Met.*, 2008, Vol. 44, no. 3, pp. 263–272, doi:10.1134/S0033173208030089.
8. Rudnev V. S., Lukiyanchuk I. V., Vasilyeva M. S., Medkov M. A., Adigamova M. V., Sergienko V. I. Aluminum- and titanium-supported plasma electrolytic multicomponent coatings with magnetic, catalytic, biocide or biocompatible properties. *Surf. Coat. Technol.*, 2016, Vol. 307, Part C, 1219–1235, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.060.
9. Grison C., Escande V., Biton J. *Ecocatalysis. A New Integrated Approach to Scientific Ecology*. Elsevier, 2015. 100 p.
10. Kašpar J., Fornasiero P., Hickey N. Automotive catalytic converters: current status and some perspectives. *Catal. Today*, 2003, Vol. 77, Iss. 4, pp. 419–449, doi: 10.1016/S0920-5861(02)00384-X.
11. □alak O. V., Karakurkchi H. V., Hrybnyuk Y. V. Fil'troventylyatsiyni ustanovky (ahrehaty) statsio-narni ta na broneob" yektakh [Filter ventilation units (units) stationary and on armored objects]. *Systemy ozbroyennya i viys'kova tekhnika*, 2016, no. 4(48), pp. 5–9.
12. Finishes, coatings, and sealants, for the protection of aerospace weapons systems. MIL-STD-7 179. Department of defense standard practice, 1997, 27 p.

13. Zunino J., Battista L., Colon N. U.S. Army Development of Active Smart Coatings™ System for Military Vehicles. *NSTI-Nanotech.*, 2005, Vol. 3, pp. 387–390.
14. Hamdy Makhlof A. S. *Handbook of Smart Coatings for Materials Protection*. Woodhead Publishing, 2014, 656 p.
15. Anodic coatings for aluminum and aluminum alloys. MIL-A-8625F, 2003, 25 p.
16. Ved M. V., Sakhnenko N. D., Karakurkchi A. V., Yermolenko I. Yu. Electroplating and functional properties of Fe-Mo and Fe-Mo-W coatings. *Iss. Chem. Chem. Technol.*, 2014, no. 5–6 (98), pp. 53–60.
17. Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Yermolenko I. Y., Nenastina T. A. Nanostructured Functional Coatings of Iron Family Metals with Refractory Elements. *Nanochemistry, Biotechnology, Nanomaterials, and Their Applications. NANO 2017*, 2018, Vol. 214, pp. 3–34, doi:10.1007/978-3-319-92567-7_1.
18. Yapontseva Y. S., Dikuser A. I., Kyblanovskii V.S. Study of the composition, corrosion, and catalytic properties of Co-W alloys electrodeposited from a citrate pyrophosphate electrolyte. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2014, no. 50, pp. 330–336, doi:10.3103/S1068375514040139.
19. Silkin S., Gotelyak A., Tsyntaru N., Dikuser A. Size effect of microhardness of nanocrystalline Co-Wcoatings produced from citrate and gluconate solutions. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2015, Vol. 51, pp. 228–234, doi:10.3103/S106837551503014X.
20. Tsyntaru N., Dikuser A., Cesiulis H., Celis J.-P., Bobanova Zh., Sidel'nikova S., Belevskii S., Yapontseva Yu., Bersirova O., Kublanovskii V. Tribological and corrosive characteristics of electrochemical coatings based on cobalt and iron superalloys. *Powder Metall. Met. Ceram.*, 2009, Vol. 48, no. 7–8, pp. 419–428, doi:10.1007/s11106-009-9150-7.
21. Bobanova Zh. I., Dikuser A. I., Cesiulis H., Tsyntaru N. I., Prosycevas I. Micromechanical and tribological properties of nanocrystalline coatings electrodeposited from citrate-ammonia solutions. *Russ. J. Electrochem.*, Vol. 45, no. 8, pp. 895–901, doi:10.1134/S1023193509080096.
22. Letov S. S., Serebrovskiy V. V., Afanasev E. A. Primenenie elektroosazhdennykh binarnykh pokrytiy na osnove zheleza dlya uprochneniya i vosstanovleniya detaley mashin [Application of iron-based electrodeposited binary coatings for hardening and restoration of machine parts]. *Instrument i tehnologii*, 2012, no. 2, pp. 26–32.
23. Gadalov V. N., Serebrovskiy V. I., Skripina Yu. V. Renovatsiya mashinostroitelnoy i selskohozyaystvennoy tehniky galvanicheskimi zhelezohromistyimi pokrytiyami s primeneniem tsementatsii [Renovation of machine-building and agricultural machinery with electroplated iron-chromium coatings using cementation]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 1–2, pp. 90–94.
24. Tsyntaru N., Cesiulis H., Donten M., Sort J., Pellicer E., Podlaha-Murphy E. J. Modern Trends in Tungsten Alloys Electrodeposition with Iron Group Metals. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2012, Vol. 48, no. 6, pp. 491–520, doi:10.3103/S1068375512060038.
25. Podlaha E. J., Landolt D. Induced codeposition: III. Molybdenum alloys with nickel, cobalt and iron. *J. Electrochem. Soc.*, 1997, Vol. 144, no. 5, pp. 1672–1680.
26. Podlaha-Murphy E. J. Electrodeposition of Ni-Fe-Mo-W Alloys. 1st Quarterly Report January-March, 2013. *NASF Surf. Technol. White Papers*, 2013, Vol. 77, no. 12, pp. 11–17.
27. Sun S., Bairachna T., Podlaha E. J. Induced Codeposition Behavior of Electrodeposited NiMoW Alloys. *J. Electrochem. Soc.*, 2013, Vol. 160, no. 10, pp. 434–440.
28. Silva M., Kola A., Duarte K., Sun S., Podlaha E.J. Plating of NiW, NiMo and NiMoW with and without Fe: Induced codeposition mechanism. *National Association for Surface Finishing Annual Conference and Trade Show, SUR/FIN 2014*, 2014, Vol. 1, pp. 575–596.
29. Yermolenko I. Yu., Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Sachanova Y. I. Composition, Morphology, and Topography of Galvanic Coatings Fe-Co-W and Fe-Co-Mo. *Nanosci. Res. Lett.*, 2017, Vol. 12, pp. 352, doi:10.1186/s11671-017-2128-3.
30. Sakhnenko M., Ved' M., Karakurkchi H., Yermolenko I., Zyubanova S. Resursozashchadzhuval'na tekhnologiya vidnovlennya znoshenykh detaley [Resource-saving technology for restoration of worn parts]. *Intehrovani tekhnolohiyi ta resursozberezhennya*, 2013, no 2, pp. 9–13.
31. Okada A. *Innovative materials for automotive industry*. New York: Nova Science Publishers, 2010. 147 p.
32. Glazoff M. V., Zolotarevsky V. S., Belov N. A. *Casting Aluminum Alloys*. Elsevier, Oxford, 2007, 544 p.
33. Lukiyanchuk I. V., Rudnev V. S., Tyrina L. M. Plasma electrolytic oxide layers as promising systems for catalysis. *Surf. Coat. Technol.*, 2016, Vol. 307, Part C, pp. 1183–1193.
34. Karakurkchi A. V., Sakhnenko M. D., Ved M. V., Gorohivskiy A. S., Galak O. V., Menshov S. M., Matykin O. V. Cobalt and manganese oxide catalytic systems on valve metals in ecotechnologies. *Prom. Mater. Proc. Appl. Electrochem.: monogr.* Kyiv : KNUTD, 2017, pp. 214–223.
35. Kolmykov D.V., Goncharov A.N. Kombinirovannyye metody uprochneniya [Combined methods of hardening]. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*, 2012, Iss. 6 (24), pp. 46–50.
36. Mazurenko Ye. A., Herasymchuk A. I., Ovsyannykov V. P. Khimichne osazhennya z hazovoyi fazy, syntezy funktsional'nykh materialiv (ohlyad) [Chemical deposition from the gas phase, synthesis of functional materials (review)]. *Fizyka i khimiya tverdoho tila*, 2001, Vol. 2, no. 3, pp. 339–349.
37. Bobzin K., Ernst F., Richardt K., Schlaefel T., Verpoort C., Flores G. Thermal spraying of cylinder bores with the Plasma Transferred Wire Arc process. *Surf. Coat. Technol.*, 2008, Vol. 202, no. 18, pp. 4438–4443, doi:10.1016/j.surfcoat.2008.04.023.
38. Jiang B. L., Wang Y. M. Plasma electrolytic oxidation treatment of aluminium and titanium alloys. *Surf. Engin. light alloys*, 2010, pp. 110–154, doi:10.1533/9781845699451.2.110.
39. Gupta P., Tenhundfeld G., Daigle E. O., Ryabkov D. Electrolytic plasma technology: Science and engineering – An overview. *Surf. Coat. Technol.*, 2007, Vol. 201, Iss. 21, pp. 8746–8760, doi:10.1016/j.surfcoat.2006.11.023.
40. Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Karakurkchi H. V., Halak O. V. Osoblyvosti oderzhannya metaloksydnykh katalychnykh system plazmovo-elektrolitychnym oksyduvannam alyuminiyu ta tytanu v pirofosfatnykh elektrolitakh [Peculiarities of obtaining metal oxide catalytic systems by plasma-electrolytic oxidation of aluminum and titanium in pyrophosphate electrolytes]. *Visnyk NTU «KhPI»*, 2016, no. 22 (1194), pp. 171–176.
41. Dudareva N. Yu., Abramova M. M. The Structure of Plasma Electrolytic Coating Formed on Al-Si alloys by the Micro Arc Oxidation Method. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2016, Vol. 52, no. 1, pp. 128–132, doi:10.1134/S2070205116010093.

42. Burange A. S., Gawande M. B. Role of Mixed Metal Oxides in Heterogeneous Catalysis. *Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry*, 2016, pp. 1–19.
43. Korotcenkov Gh. *Metal Oxides in Heterogeneous Catalysis*. 2018, 618 p.
44. Sulka G. *Nanostructured Anodic Metal Oxides*. Elsevier, 2020, 484 p.
45. Krishtal M. M., Yasnikov I. S., Ivashin P. V., Polunin A. V. O primeneniі tehnologii mikrodogovogo oksidirovaniya dlya remonta i vosstanovleniya izdeliy iz siluminov [On the use of micro-arc oxidation technology for the repair and restoration of products made of silumin]. *Aviatsionnaya i raketo-kosmicheskaya tehnika*, 2012, no. 3 (34), pp. 225–228.
46. Krishtal M. M. Oxide Layer Formation by Micro-Arc Oxidation on Structurally Modified Al-Si Alloys and Applications for Large-Sized Articles Manufacturing. *Adv. Mater. Research*, 2009, Vol. 59, pp. 204–208, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.59.204.
47. Butusov I. A., Dudareva N. Yu. Issledovanie vliyaniya mikrodogovogo oksidirovaniya na iznosostoykost porshnya DVS [Study of the effect of microarc oxidation on the wear resistance of the internal combustion engine piston]. *Nauka i obrazovanie*, 2013, no. 9, pp. 127–144.
48. Stepanov V. A. Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazateley avtomobiley mikrodogovyim oksidirovaniem dnishch porshney dvigateley [Study of the effect of microarc oxidation on the wear resistance of the internal combustion engine piston]. *Science and world*, 2014, no. 1(5), pp. 115–117.
49. Marchenko A. P., Shpakovskiy V. V., Pylov V. V. Pidvyshhennya ekonomichnosti benzy novogo dvyguna na riznyx rezhy max roboty pry zastosuvanni chastkovodynamichnoyi teploizolyaciyi porshniv [Improving the efficiency of the gasoline engine in different modes of operation with the use of partial-dynamic insulation of pistons]. *Visnyk NTU «KhPI»*, 2013, no. 32(1005), pp. 106–110.
50. Marchenko A. P., Shpakovskiy V. V. Vliyanie korundovogo sloya na rabochih poverhnostyah porshney na protsess sgoraniya v DVS [The effect of the corundum layer on the working surfaces of the pistons on the combustion process in the internal combustion engine]. *Internal combustion engines*, 2011, no. 2, pp. 24–28.
51. Sakhnenko M., Karakurkchi A., Galak A., Menshov S., Matykin O. Examining the formation and properties of TiO₂ oxide coatings with metals of iron triad. *East-Europ. J. Enterp. Technol.*, 2017, Vol. 2, no. 11(86), pp. 4–10. doi:10.15587/1729-4061.2017.97550.
52. Khairy M., Zakaria W. Effect of metal-doping of TiO₂ nanoparticles on their photocatalytic activities toward removal of organic dyes. *Egyptian J. of Petroleum.*, 2014, Vol. 23, pp. 419–426.
53. DohLeviL-MitroviL Z., DohLeviL-MitroviL Z., Stojadinovi L S., Lozzi L., Aškrabi E S., RosiL M., TomiL N., PaunoviL N., LazoviL S., NikoliL M. G., Santucci S. WO₃/TiO₂ composite coatings: Structural, optical and photocatalytic properties. *Mater. Res. Bull.*, 2016, Vol. 83, pp. 217–224, doi:10.1016/j.materresbull.2016.06.011.
54. Yar-Mukhamedova G., Ved' M., Sakhnenko N., Koziar M. Ternary cobalt-molybdenum-zirconium coatings for alternative energies. *Appl. Surf. Sci.*, 2017, Vol. 421, Part A, pp. 68–76, doi:10.1016/j.apsusc.2017.01.196.
55. Ermolenko I. Yu., Sakhnenko N. D., Zyubanov S. I., Sachanova Yu. I. Methods for controlling the composition and morphology of electrodeposited Fe–Mo and Fe–Co–Mo coatings. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2017, Vol. 53, no. 6. pp. 525–532, doi: 10.3103/S1068375517060138.
56. Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Mayba M. V. *Konversionnyie i kompozitsionnyie pokryitiya na splavah titana: monogr. [Conversion and composite coatings on titanium alloys: monograph.]* Kharkov: NTU «KhPI», 2015, 176 p.
57. Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Karakurkchi A. V. Effect of Doping Metals on the Structure of PEO Coatings on Titanium. *Intern. J. Chem. Engin.*, 2018, Vol. 2018, Article ID 4608485, 10 p., doi: 10.1155/2018/4608485.
58. Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Karakurkchi A. V., Gorohivskiy A.S. Synthesis of catalytic cobalt-containing coatings on alloy AL25 surface by plasma electrolytic oxidation. *Chemistry, Physics and Technology of Surface*, 2017, Vol. 8, no. 1, pp. 73–79.
59. Karakurkchi A. V., Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Luhovskiy I. S., Drobakha H. A., Mayba M. V. Features of plasma electrolytic formation of manganese- and cobalt-containing composites on aluminum alloys. *Adv. Mater. Sci. Engin.*, 2019, Vol. 2019, Article ID 6381291, 13 p., doi:10.1155/2019/6381291.
60. Karakurkchi H. V., Ved' M. V., Yermolenko I. Yu., Sakhnenko M. D. *Elektrolitychni pokryttya splavamy zaliza dlya zmitsnennya i zakhystu poverkhni* [Electrolytic coatings of iron alloys to strengthen and protect the surface]. Kharkiv: FOP Panov, 2017, 200 p.
61. Karakurkchi A., Sakhnenko M., Ved' M., Yermolenko I., Pavlenko S., Yevsieiev V., Pavlov Y., Yemanov V. Determining features of application of functional electrochemical coatings in technologies of surface treatment. *East-Europ. J. Enterp. Technol.*, 2019. Vol. 3, no. 12 (99), pp. 29–38, doi:10.15587/1729-4061.2019.171787.
62. Method of formation of oxide nanodisperse coatings on aluminium alloys: pat. 4978 Republic of Kazakhstan, C25D 3/12, C25D 11/02, C25D 11/04, C25D 11/06. 2019/1012.2; declar. 18.11.2019, publ. 29.05.2020, Bul. № 21.
63. Parsadanov I. V., Sakhnenko M. D., Khyzhnyak V. O., Karakurkchi H. V. Improving the environmental performance of engines by intra-cylinder neutralization of toxic exhaust gases. *Internal Combustion Engines*, 2016, Vol. 2, pp. 63–67, doi: 10.20998/0419-8719.2016.2.12.
64. Low J., Yu J., Jaroniec M., Wageh S., Al-Ghamdi A. A. Heterojunction Photocatalysts. *Adv. Mater.*, 2017, Vol. 29, 1601694, doi:10.1002/adma.201601694.
65. Wong Y. H., Affendy M. G., Lau S. K. Effects of anodisation parameters on thin film properties: a review. *Mater. Sci. Technol.*, 2017, no. 33, pp. 699–711. doi:10.1080/02670836.2016.1193654.

Відомості про авторів (About authors)

Каракуркчі Ганна Володимирівна – доктор технічних наук, старший дослідник, начальник навчального відділу Військового інституту танкових військ, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1287-3859; e-mail: anyutikukr@gmail.com.

Hanna Karakurkchi – Doctor of Technical Sciences, Senior researcher, Head of the Training Department of the Military Institute of Armored Forces, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1287-3859; anyutikukr@gmail.com.

Сахненко Микола Дмитрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

Mykola Sakhnenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Physical Chemistry, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

Єрмоленко Ірина Юріївна – доктор технічних наук, старший дослідник, доцент кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5496-9621; e-mail: kirileshta72@gmail.com.

Irina Yermolenko – Doctor of Technical Sciences, Senior researcher, Associated Professor of the Department of Physical Chemistry, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5496-9621; e-mail: kirileshta72@gmail.com.

Індигов Сергій Миколайович – аспірант кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-9156-3324; e-mail: serj86483@gmail.com.

Serhii Indykov – postgraduate, Department of Physical Chemistry, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-9156-3324; serj86483@gmail.com.

Горохівська Наталія Валентинівна – аспірант кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-7494-175X; e-mail: natagor989@gmail.com.

Natalia Horokhivska – postgraduate, Department of Physical Chemistry, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7494-175X; natagor989@gmail.com.

Сарай Василь Володимирович – старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії Військового інституту танкових військ, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-0011-000X; e-mail: saraj.v.v@gmail.com.

Vasyl Sarai – senior researcher of research laboratory of Military Institute of Armored Forces, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0011-000X; saraj.v.v@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Єрмоленко І. Ю., Індигов С. М., Горохівська Н. В., Сарай В. В. Функціональні електрохімічні покриття у технологіях подвійного призначення. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 101-112. doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.15.

Please cite this article as:

Karakurkchi H., Sakhnenko M., Yermolenko I., Indykov S., Horokhivska N., Sarai V. Functional electrochemical coatings in dual-use technologies. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 101-112, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.15.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Каракуркчи А. В., Сахненко Н. Д., Ермоленко И. Ю., Индыгов С. Н., Гороховская Н. В., Сарай В. В. Функциональные электрохимические покрытия в технологиях двойного назначения. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 101-112. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.15.

АННОТАЦІЯ Проаналізовані технологічні підходи к примененію функціональних електрохімічних покриттів в технологіях громадянського і військового призначення. Показано, що існуючі технічні рішення направлені на рішення задач упрочнення поверхностей і детоксикації серед от забруднюючих агентів природного і штучного походження. Електрохімічні покриття на основі триади заліза, легіровані тугоплавкими металами, підвищують корозійну стійкість, мікротвердість і зносостійкість поверхностей. Синтезовані методом плазменно-електролітного окислення на сплавах алюмінію і титану гетерооксидні покриття, допировані перехідними металами, мають каталітичні властивості по нейтралізації токсичних речовин в газовій і рідкій фазах. Досліджені особливості електрохімічного формування функціональних покриттів на конструкційних матеріалах різного типу. Показано, що катодним осадженням постійним і імпульсним струмом на низькоуглеродистій сталі і сірому чугуні формуються рівномірні тернарні покриття Fe-Mo-W і композиційні системи Fe-Co-Mo (Fe-Co-W), які мають підвищену корозійну стійкість і механічними показателями в порівнянні з матеріалом метал-носія. Отримані тонкослойні покриття рекомендовані для відновлення і упрочнення зношених поверхностей, в частині в технологіях ремонту озброєння і військової техніки. Установлено, що плазменно-електролітною обробкою порицевого силуміна в щелочних розчинах на основі дифосфатів синтезовані гетерооксидні системи, проявляють активність в зниженні токсичних викидів двигателів внутрішнього згорання і часового витрати палива. Показано, що нанокмполімерні покриття на титані проявляють фотокаталітичну активність по деструкції модельних забруднюючих агентів. Отримані матеріали мають комплекс підвищених функціональних властивостей і є перспективними для застосування в промисловому і ремонтному виробництві, в т.ч. для сектору безпеки і оборони.

Ключеві слова: електрохімічне покриття; плазменно-електролітне окислення; катодне осадження; нанокмполімер; функціональні властивості

Надійшла (received) 03.05.2021

УДК 66.094.942

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.16

ВПЛИВ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОКСИДІВ d-МЕТАЛІВ НА ТРАНСЕСТЕРИФІКАЦІЮ СОНЯШНИКОВОЇ ОЛІЇ

Ю. Р. МЕЛЬНИК^{1*}, С. Р. МЕЛЬНИК¹, Г. Я. МАГОРІВСЬКА², В. В. РЕУТСЬКИЙ¹

¹ кафедра технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА

² кафедра хімічної технології силікатів, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА

*e-mail: yurii.r.melnyk@lpnu.ua

АНОТАЦІЯ Досліджено фізико-хімічні властивості оксидів d-металів (NiO, CuO, MnO, FeO, PbO, ZnO), які є гетерогенними катализаторами процесу трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії етанолом та бутан-1-олом. Для цих оксидів визначено доступну питому площу поверхні, поверхневу кислотність і основність та зміну водневого потенціалу суспензії катализатора у воді. Доступну питому площу поверхні оксидів визначено титруванням їхньої водної суспензії розчином метиленового синього з відомою концентрацією, а їхню поверхневу кислотність та основність – зворотним титруванням зразків, оброблених водним розчином аміаку та оцтової кислоти, відповідно. Встановлено, що всі досліджені оксиди d-металів мають низьку питому площу поверхні – її значення знаходиться в межах 0,6–1,5 м²/г. Поверхнева кислотність та основність вказаних катализаторів становить 0,13–0,27 ммоль/г та 0,019–0,066 ммоль/г, відповідно. Показано, що зміна водневого потенціалу водної суспензії досліджених катализаторів відносно рН дистильованої води є найбільшою для NiO та ZnO і становить 0,6–0,65, тоді як для CuO ця зміна є найменшою і становить лише 0,3. Характер кривих зміни рН і значення рН суспензії оксидів у стані рівноваги свідчать про те, що для досліджених катализаторів характерна наявність слабких кислотних центрів. Вказані характеристики катализаторів порівняно з результатами, отриманими в процесі трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії етанолом та бутан-1-олом. Встановлено, що спостерігається кореляція між поверхневою кислотністю катализатора і початковою швидкістю реакції трансестерифікації тригліцеридів етанолом та бутан-1-олом. Одночасно така кореляція відсутня для поверхневої основності досліджених оксидів металів, що узгоджується з даними щодо каталізу реакції трансестерифікації тригліцеридів лише сильними основними активними центрами. Зроблено висновок, що реакція трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії етанолом та бутан-1-олом відбувається насамперед на слабких кислотних центрах оксидів d-металів.

Ключові слова: трансестерифікація; оксиди металів; питома площа поверхні; поверхнева кислотність; поверхнева основність.

EFFECT OF PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF d-METAL OXIDES ON SUNFLOWER OIL TRANSESTERIFICATION

Yu. MELNYK^{1*}, S. MELNYK¹, H. MAHORIVSKA², V. REUTSKYY¹

¹ Department of Organic Products Technology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

² Department of Chemical Technology of Silicates, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

ABSTRACT The physicochemical indicators of d-metal oxides (NiO, CuO, MnO, FeO, PbO, ZnO) which are heterogeneous catalysts for the transesterification process of sunflower oil triglycerides by ethanol and butan-1-ol have been determined. The available specific surface area, surface acidity and basicity, as well as the hydrogen potential change of the catalyst suspension in water were determined for the oxides. The available specific surface area of the oxides was determined by titration of their aqueous suspension with a solution of methylene blue with a predetermined concentration. The surface acidity and basicity of the catalysts were determined by back titration of samples treated with an aqueous solution of ammonia and acetic acid, respectively. It was found that all investigated d-metal oxides have a low specific surface area. The value of specific surface area is in the range of 0.6-1.5 m²/g. The surface acidity and basicity of the catalysts is 0.13-0.27 mmol/g and 0.019-0.066 mmol/g, respectively. It is shown that the change in the aqueous suspension hydrogen potential of the investigated catalysts relative to the distilled water pH is maximum for NiO and ZnO and it is 0.6-0.65, while for CuO this change is the smallest and it is only 0.3. The character of the pH change curves and the pH values of the oxides suspension in equilibrium condition indicate the presence of weak acid sites in the studied catalysts. The indicated catalysts characteristics are compared with the results obtained in the transesterification process of sunflower oil triglycerides by ethanol and butan-1-ol. It was found that there is a correlation between the surface acidity of catalyst and the reaction initial rate of triglycerides transesterification by ethanol and butan-1-ol. At the same time, such a correlation is absent for the surface basicity of the catalysts. This is consistent with the data on the catalysis of the triglyceride transesterification reaction only by strong major active sites. It is concluded that the transesterification reaction of sunflower oil triglycerides by ethanol and butan-1-ol occurs predominantly on the weak acid centers of the d-metal oxides.

Keywords: transesterification; metal oxides; specific surface area; surface acidity; surface basicity

Вступ

На сьогодні єдиними промисловими катализаторами реакції трансестерифікації

тригліцеридів метанолом є гідроксиди або алкоксиди калію чи натрію. Хоча вказані катализатори переважно застосовують у реакції метанолізу, вони виявляють

активність і в реакціях трансестерифікації тригліцеридів іншими аліфатичними спиртами, наприклад бутан-1-олом [1,2]. Оскільки вони мають істотні недоліки, триває інтенсивний пошук каталізаторів, які дадуть змогу здійснювати реакцію трансестерифікації із застосуванням сировини з високим вмістом вільних жирних кислот або води, а також будуть легко відділятися від реакційної суміші. Тому особлива увага зосереджена на дослідженні гетерогенних основних та кислотних каталізаторів.

Для вивчення закономірностей трансестерифікації тригліцеридів у присутності гетерогенних каталізаторів важливим є дослідження їхніх властивостей та встановлення взаємозв'язку цих властивостей і активності каталізатора в реакції. Встановлення такого взаємозв'язку дасть змогу прогнозувати можливість використання тих чи інших речовин як каталізаторів трансестерифікації.

У роботі [3] наведено результати дослідження метанолізу тригліцеридів ріпакової олії в присутності гетерогенних основних каталізаторів – гідроксидів літію, натрію чи калію, або карбонатів натрію чи калію, нанесених на $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Для вказаних каталізаторів за допомогою індикаторів Гамета визначено їхню основність, а методом Бертрана-Еммета-Теллера – їхню питому поверхню. Авторами показано, що вихід метилових естерів знаходиться в чіткій кореляції з питомою основністю досліджених каталізаторів (ммоль/г).

Одержання метилових естерів вищих жирних кислот трансестерифікацією пальмової олії в присутності карбонату калію нанесеного на оксид кремнію вивчено в роботі [4]. Авторами визначено залежність питомої поверхні каталізатора (методом Бертрана-Еммета-Теллера) та основності каталізатора (методом температурно-програмованої десорбції карбон (IV) оксиду) від кількості карбонату калію, нанесеного на носій. Показано, що основність каталізатора суттєво залежить від кількості нанесеного карбонату калію – зі збільшенням кількості нанесеного активного компоненту зростають основність каталізатора та кількість сильних основних центрів.

У роботі [5] показано, що частота оборотів каталізатора (turnover frequency, TOF) знаходиться в прямій залежності від сили його кислотних центрів. Водночас не спостерігається залежність між кислотністю каталізатора та його питомою продуктивністю. Авторами також показано, що запропоновані ними каталізатори на основі гетерополікислот виявляють схильність до вилуговування, і в реакційній системі одночасно спостерігається гомогенний та гетерогенний катализ.

Результати дослідження реакції трансестерифікації метилпальмітату триетаноламіном у присутності кальцій-алюміній гідроксикарбонату наведено в роботі [6]. Авторами визначені властивості каталізаторів, зокрема їхня питома поверхня. Проте

висновків про вплив властивостей каталізатора на його активність у роботі не зроблено.

Результати дослідження реакції естерифікації стеаринової, олеїнової та пальмітинової кислот спиртами $\text{C}_1\text{--C}_4$ відображені в роботі [7]. Відомо, що кращими каталізаторами реакції естерифікації є кислоти Бренстеда. Авторами досліджені як каталізатори реакції естерифікації монтморилонітові глини. Для вказаних каталізаторів досліджено їхні властивості, зокрема визначено питому поверхню, пористість, кислотність (за Бренстедом та за Льюїсом) та силу кислотних центрів. Показано, що активність каталізаторів пропорційна до концентрації бренстедівських кислотних центрів та до їхньої сили.

Трансестерифікація відпрацьованої олії метанолом у присутності каталізаторів – гідротальцитів – досліджена в широкому інтервалі умов [8]. За допомогою індикаторів Гамета авторами встановлено, що основність кращих із досліджених каталізаторів є вищою за 11. Вказані каталізатори дають змогу за оптимальних умов досягти практично теоретичного виходу метилових естерів.

Естерифікацію пальмітинової кислоти метанолом досліджено за температури $60\text{ }^\circ\text{C}$ у присутності сульфонованих органічних каталізаторів [9]. Як органічні каталізатори в роботі використано кополімери полівінілового спирту та сульфобурштинової кислоти і полістирену та дивінілбензену із сульфогрупами. Встановлено, що конверсія пальмітинової кислоти мало залежить від повної обмінної статичної ємності каталізатора. Таке явище автори пояснюють різним гідрофобно-гідрофільним балансом полімерних матриць досліджених каталізаторів.

Результати дослідження закономірностей трансестерифікації олії макаоби етанолом наведені в роботі [10]. Як каталізатори використано частково заміщені гетрополікислоти. Показано, що часткова заміна протонів у молекулі гетрополікислоти на іони олова веде до збільшення активності каталізатора. Авторами висловлене припущення, що зменшення кількості протонів у складі гетрополікислоти веде до збільшення їхньої рухливості та підвищення кислотності каталізатора за Бренстедом.

Трансестерифікацію відпрацьованої рослинної олії метанолом досліджено в присутності нанесеного $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ каталізатора [11]. Авторами показано, що для переробки відпрацьованої олії каталізатор повинен мати оптимальне співвідношення основних та кислотних активних центрів. Характерним є те, що сильні основні центри не є гарантією високої активності каталізатора в реакції трансестерифікації – на таких центрах можлива незворотна адсорбція продуктів реакції.

Таким чином, у більшості робіт показано достатньо чітку кореляцію між такими властивостями каталізатора як його кислотність чи основність та активністю каталізатора в реакціях естерифікації та трансестерифікації.

В роботах [12-16] показано, що оксиди металів виявляють високу активність у реакціях трансестерифікації тригліцеридів олій спиртами C_1 – C_4 та естерифікації олеїнової кислоти бутан-1-олом.

Мета роботи

Метою роботи було визначення фізико-хімічних показників оксидів d-металів як каталізаторів трансестерифікації та естерифікації та їх співставлення з результатами, отриманими в присутності вказаних каталізаторів.

Виклад основного матеріалу

У роботі досліджено такі оксиди d-металів: NiO, CuO, MnO, FeO, PbO, ZnO. Всі вказані оксиди мали ступінь чистоти «х.ч.».

Для досліджених оксидів d-металів визначали доступну питому площу поверхні та значення поверхневої кислотності та основності.

Доступну питому площу поверхні оксидів d-металів визначали методом адсорбції метиленового синього за методикою описаною в роботах [17,18]. За об'ємом розчину метиленового синього з відомою концентрацією, витраченого на титрування наважки досліджуваного оксиду d-металу розраховували питому площу поверхні каталізатора:

$$S_{num} = \frac{V_T \cdot N_A \cdot S_{MC} \cdot m_{MC}}{M_{MC} \cdot V_0 \cdot m_K} \quad (1)$$

де N_A – число Авогадро, $6,023 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹, S_{MC} – площа однієї молекули метиленового синього, $1,3 \cdot 10^{-18}$ м²; M_{MC} – молярна маса метиленового синього, 319,87 г/моль, m_{MC} – маса наважки метиленового синього, витрачена на приготування розчину для титрування, г, V_0 – об'єм приготованого розчину метиленового синього, см³, V_T – об'єм розчину метиленового синього, витрачений на титрування, см³, m_K – маса наважки оксиду d-металу, г.

Для визначення кислотності та основності оксидів d-металу було розроблено окремі методики, для яких за основу було взято методику описану в роботах [19, 20]. Визначення концентрації кислотних та основних центрів ґрунтувалося на їх взаємодії з аміаком та оцтовою кислотою, відповідно. Вказані реагенти вносили у вигляді водних розчинів з відомою концентрацією. Для визначення кислотності наважку каталізатора витримували протягом 30 хв у відомому об'ємі водного розчину аміаку концентрацією 0,01 моль/дм³, після чого відбирали аліквотну частину та титрували її розчином сульфатної кислоти концентрацією 0,005 моль/дм³ у присутності 1 %-го розчину фенолфталеїну. За значенням об'єму розчину сульфатної кислоти, витраченого на титрування, розраховували поверхневу кислотність каталізатора (моль/г каталізатора):

$$C_K = \frac{k \cdot (V_A \cdot C_A - V_{CK} \cdot C_{CK})}{1000 \cdot m_K} \quad (2)$$

де V_A – об'єм розчину аміаку, в якому витримували наважку каталізатора, см³, C_A – концентрація розчину аміаку, 0,01 моль/дм³, V_{CK} – об'єм розчину сульфатної кислоти, витрачений на титрування аліквотної частини розчину аміаку, см³, C_{CK} – концентрація розчину сульфатної кислоти, 0,005 моль/дм³, k – коефіцієнт, який враховує співвідношення об'єму розчину аміаку, в якому витримували наважку каталізатора, та розчину аміаку взятого на титрування, m_K – маса наважки оксиду металу, г.

За аналогічною методикою визначали основність досліджуваних каталізаторів. Наважку каталізатора витримували протягом 30 хв у відомому об'ємі розчину оцтової кислоти концентрацією 0,01 моль/дм³. Після цього відбирали аліквотну частину розчину та титрували його розчином гідроксиду натрію концентрацією 0,01 моль/дм³ у присутності 1 %-го розчину фенолфталеїну. За значенням об'єму розчину гідроксиду натрію, витраченого на титрування, розраховували поверхневу основність каталізатора (моль/г каталізатора):

$$C_O = \frac{k \cdot (V_{OK} \cdot C_{OK} - V_L \cdot C_L)}{1000 \cdot m_K} \quad (3)$$

де V_{OK} – об'єм розчину оцтової кислоти, в якому витримували наважку каталізатора, см³, C_{OK} – концентрація розчину оцтової кислоти, 0,01 моль/дм³, V_L – об'єм розчину гідроксиду натрію витрачений на титрування аліквотної частини розчину оцтової кислоти, см³, C_L – концентрація розчину гідроксиду натрію, 0,01 моль/дм³, k – коефіцієнт, який враховує співвідношення об'єму розчину оцтової кислоти, в якому витримували наважку каталізатора, та розчину оцтової кислоти взятого на титрування, m_K – маса наважки оксиду металу, г.

Для оцінки сили кислотних центрів використовували вимірювання зміни водневого потенціалу водної суспензії відповідного оксиду d-металу. Значення рН водної суспензії вимірювали за допомогою рН-метра рН-150МИ за методикою, описаною в роботі [21]. З цієї метою визначали рН дистильованої води (попередньо прокип'яченої та охолодженої без доступу повітря для вилучення розчиненого CO₂), відтак при інтенсивному перемішуванні в дистильовану воду вносили наважку каталізатора та вимірювали зміну рН отриманої суспензії в часі.

За результатами досліджень встановлено, що питома площа поверхні всіх каталізаторів – оксидів d-металів, має низькі значення (табл. 1). Найменша питома площа поверхні характерна для PbO і CuO, у присутності яких також спостерігаються й низькі значення початкової швидкості реакції трансестерифікації та конверсії тригліцеридів [13,14].

Найбільша питома площа поверхні характерна для оксидів d-металів, які забезпечують високу початкову швидкість реакції трансестерифікації соняшникової олії етанолом та бутан-1-олом та найвищі значення конверсії тригліцеридів [13,14].

Таблиця 1 – Фізико-хімічні властивості оксидів d-металів – каталізаторів трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії етанолом та бутан-1-олом

Каталізатор	Питома площа поверхні, м ² /г	Поверхнева кислотність каталізатора, ммоль/г	Поверхнева основність каталізатора, ммоль/г
PbO	0,6	0,14	0,019
FeO	1,1	0,17	0,054
CuO	0,7	0,13	0,035
MnO	0,9	0,27	0,065
NiO	1,2	0,20	0,066
ZnO	1,5	0,22	0,066

Значення поверхневої кислотності досліджених оксидів d-металів відрізняються практично в два рази (табл. 1). Найвища поверхнева кислотність спостерігається для MnO, а найнижча кислотність характерна для PbO і CuO.

Поверхнева основність досліджених каталізаторів є істотно нижчою, ніж їхня поверхнева кислотність (табл. 1). Як і в попередніх випадках найнижче значення поверхневої основності характерне для PbO і CuO, тоді як решта оксидів металів характеризуються близькою або практично однаковою поверхневою основністю. Разом з тим для цих оксидів характерна основність практично в 2–3 рази вища ніж для PbO і CuO.

Для оцінки сили кислотних та основних центрів каталізаторів визначали зміну водневого потенціалу водної суспензії оксиду d-металу (рис. 1).

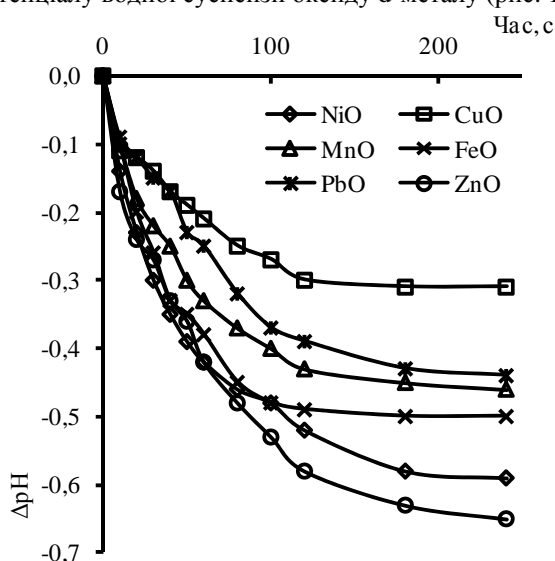


Рис. 1 – Зміна водневого потенціалу суспензії каталізатора оксиду d-металу з часом. Момент внесення каталізатора прийнято за 0 с

Встановлено, що водневий потенціал суспензії всіх досліджених оксидів d-металів різко знижується протягом перших 100 с після їх занурення в дистильовану воду. У подальшому до 240 с він практично не змінюється або змінюється незначно (оксиди цинку та нікелю) (рис.1).

Встановлено, що найменше змінюється відносно початкового водневого потенціалу дистильованої води рН водної суспензії CuO – значення водневого потенціалу знижується приблизно на 0,3. Водночас, зміна значення рН водної суспензії NiO та ZnO досягає 0,6 та 0,65 відповідно (рис. 1).

Відносно тривалий час встановлення рівноваги та значення рН водної суспензії оксиду d-металу в стані рівноваги свідчать про наявність на поверхні досліджених каталізаторів слабких кислотних центрів.

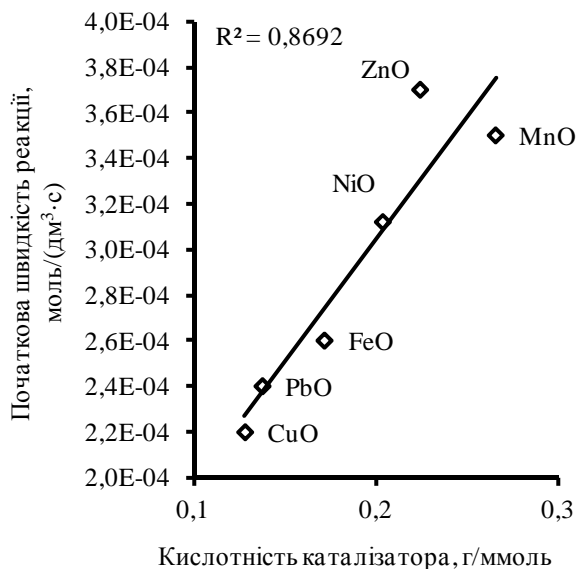
Обговорення результатів

Отримані характеристики оксидів d-металів, зокрема значення питомої площі поверхні каталізаторів та їхньої поверхневої кислотності й основності співставлено з початковою швидкістю реакції та конверсією тригліцеридів, досягнутими в процесі трансестерифікації соняшникової олії етанолом і бутан-1-олом [13-15]. Встановлено, що існує достатньо чітка кореляція між поверхневою кислотністю досліджених оксидів металів та початковою швидкістю реакції трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії етанолом (рис. 2а), про що свідчить високе значення коефіцієнта достовірності апроксимації R^2 (вказано на графіку).

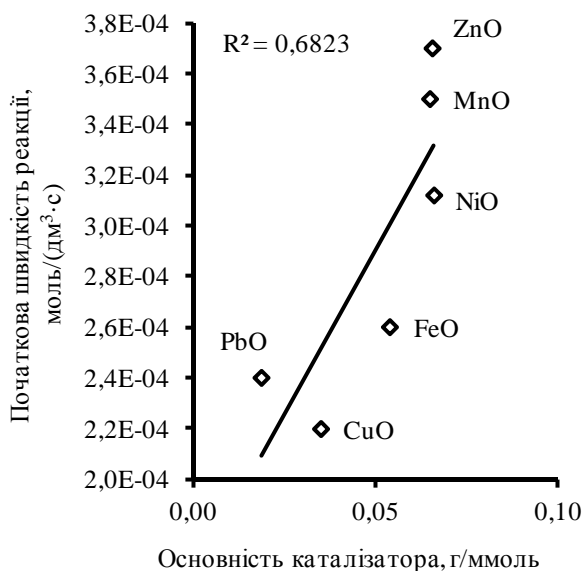
Каталізатори, для яких властиві низькі значення поверхневої кислотності – PbO і CuO, забезпечують найнижчу швидкість реакції трансестерифікації. Водночас, ZnO та MnO, поверхнева кислотність яких є найвищою (табл. 1), у реакції трансестерифікації тригліцеридів етанолом дають змогу досягнути найвищих значень початкової швидкості реакції (рис. 2, а).

Разом з тим, при співставленні значень початкової швидкості реакції трансестерифікації з поверхневою основністю досліджених каталізаторів не спостерігається чіткої кореляції (рис. 2, б). Такі результати можна пояснити тим, що основний катализ реакції трансестерифікації зумовлений, перш за все, наявністю на поверхні каталізатора сильних основних центрів, а досліджені каталізатори характеризуються наявністю лише слабких основних центрів, які не можуть бути ефективними каталізаторами реакції трансестерифікації. Про це свідчить зміна рН суспензії оксидів d-металів (рис. 1).

Порівняння результатів, отриманих під час трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії бутан-1-олом, з визначеними характеристиками каталізаторів також вказує на чітку залежність початкової швидкості реакції від поверхневої кислотності каталізатора (рис. 3, а).



а

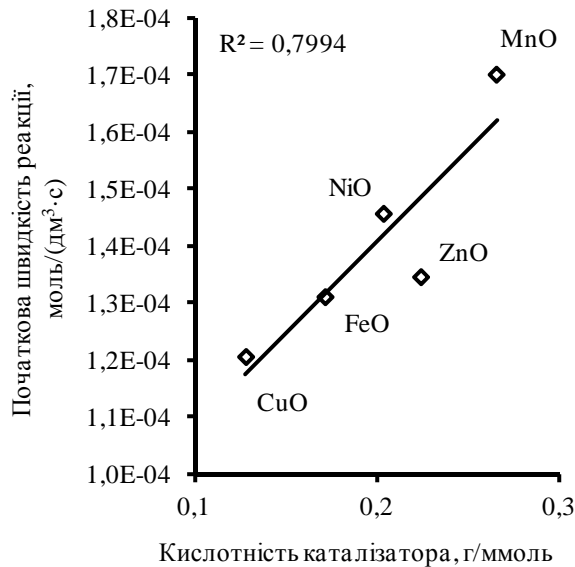


б

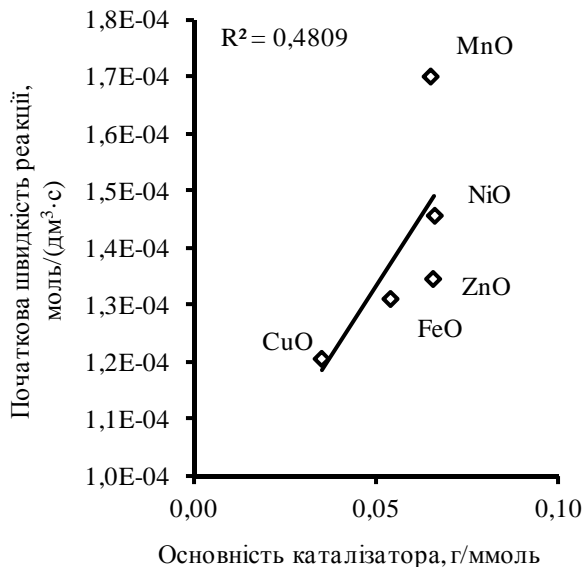
Рис. 2 – Залежність початкової швидкості реакції трансестерифікації тригліцеридів етанолом [13, 14] від поверхневої кислотності (а) та поверхневої основності (б) каталізатора

Кореляція між значенням початкової швидкості реакції взаємодії тригліцеридів з бутан-1-олом та поверхневої основності досліджених каталізаторів також не спостерігається (рис. 3, б).

Отримані результати вказують, що реакція трансестерифікації тригліцеридів етанолом та бутан-1-олом у присутності досліджених оксидів d-металів відбувається насамперед на слабких кислотних центрах, а отже за механізмом кислотного каталізу.



а



б

Рис. 3 – Залежність початкової швидкості реакції трансестерифікації тригліцеридів бутан-1-олом [15] від поверхневої кислотності (а) та поверхневої основності (б) каталізатора

Щодо конверсії тригліцеридів яка досягається в присутності того чи іншого дослідженого оксиду металу, то можна стверджувати про відсутність чіткої кореляції між її значенням та визначеними для вказаного каталізатора значеннями питомої кислотності чи основності.

Висновки

Одержані результати досліджень показують, що всі вивчені оксиди металів – каталізатори реакції трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії етанолом або бутан-1-олом характеризуються

низькою доступною питомою площею поверхні, значення якої знаходиться в межах 0,6–1,5 м²/г. Питома поверхнева кислотність та основність досліджених оксидів металів знаходиться в межах 0,13–0,27 ммоль/г та 0,019–0,066 ммоль/г.

Порівняння отриманих характеристик оксидів металів із результатами їх застосування в реакції трансестерифікації тригліцеридів етанолом або бутан-1-олом дало змогу зробити висновок про чітку кореляцію між поверхневою кислотністю досліджених каталізаторів та початковою швидкістю реакції трансестерифікації. Закономірною є відсутність такої кореляції між питомою основністю поверхні та початковою швидкістю, оскільки основний каталіз реакції трансестерифікації відбувається лише на сильних основних центрах.

Зроблено висновок про те, що при використанні вказаних оксидів d-металів, каталіз реакції трансестерифікації відбувається на їхніх слабких кислотних активних центрах.

Список літератури

1. Patrylak L. K., Zubenko S. O., Konovalov S. V., Povazhnyi V. A. Alkaline transesterification of sunflower oil triglycerides by butanol-1 over potassium hydroxide and alkoxides catalysts. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2019. № 5. P. 93-103. doi:10.32434/0321-4095-2019-126-5-93-103.
2. Патриляк Л. К., Зубенко С. О., Коновалов С. В. Переестерифікація ріпакової олії бутанолом на лужних каталізаторах. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2018. № 5. P. 125-130. doi:10.32434/0321-4095-2019-126-5-93-103.
3. Ilgen O., Akin A. Development of Alumina Supported Alkaline Catalysts Used for Biodiesel Production. *Turkish Journal of Chemistry*. 2009. № 33. P. 281-287. doi:10.3906/kim-0809-29.
4. Irmawati R., Shafizah I., Nur Sharina A., Abastabar Ahangar H., Taufiq-Yap Y. H. Transesterification of Palm Oil by Using Silica Loaded Potassium Carbonate (K₂CO₃/SiO₂) Catalysts to Produce Fatty Acid Methyl Esters (FAME). *Energy and Power*. 2014. № 1(4). P. 7-15. doi: 10.5923/j.ep.20140401.02.
5. Alsalmeh A., Kozhevnikova E. F., Kozhevnikov I. V. Heteropoly acids as catalysts for liquid-phase esterification and transesterification. *Applied Catalysis A: General*. 2008. № 349(1-2). P. 170–176. doi:10.1016/j.apcata.2008.07.027.
6. Aziz H. A., Aroua M. K., Yusoff R., Abas N. A., Idris Z., Hassan H. A. Production of Palm-Based Esteramine Through Heterogeneous Catalysis. *Journal of Surfactants and Detergents*. 2015. № 19(1). P. 11–18. doi: 10.1007/s11743-015-1736-0.
7. Bouguerra Neji S., Trabelsi M., Frikha M. Esterification of Fatty Acids with Short-Chain Alcohols over Commercial Acid Clays in a Semi-Continuous Reactor. *Energies*. 2009. № 2(4). P. 1107–1117. doi: 10.3390/en20401107.
8. Brito A., Borges M. E., Garín M., Hernández A. Biodiesel Production from Waste Oil Using Mg–Al Layered Double Hydroxide Catalysts. *Energy & Fuels*. 2009. № 23(6). P. 2952–2958. doi: 10.1021/ef801086p.
9. Caetano C. S., Guerreiro L., Fonseca I. M., Ramos A., Vital J., Castanheiro J. E. Esterification of fatty acids to biodiesel over polymers with sulfonic acid groups. *Applied Catalysis A: General*. 2009. № 359(1-2). P. 41–46. doi: 10.1016/j.apcata.2009.02.028.
10. Da Silva M. J., Vilanculo C. B., Teixeira M. G., Julio A. A. Catalysis of vegetable oil transesterification by Sn(II)-exchanged Keggin heteropolyacids: bifunctional solid acid catalysts. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 2017. № 122(2). P. 1011–1030. doi: 10.1007/s11144-017-1258-z.
11. Farooq M., Ramli A., Naeem A., Saleem Khan, M. Effect of different metal oxides on the catalytic activity of γ -Al₂O₃–MgO supported bifunctional heterogeneous catalyst in biodiesel production from WCO. *RSC Advances*. 2016. № 2(6). P. 872–881. doi: 10.1039/C5RA18146A.
12. Melnyk Yu., Starchevskiy R. Heterogeneous catalytic transesterification of glycerol trioleate in the field of ultrasonic waves. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. 2016. № 42(1214). P. 188–192. doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.30.
13. Melnyk Yu., Starchevskiy R., Melnyk S. Transesterification of triglycerides by ethanol in the presence of metal oxides. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. 2019. № 5(1330). P. 132-138. doi: 10.20998/2413-4295.2019.05.17.
14. Melnyk Yu., Starchevskiy R., Melnyk S. Technological Aspects of Vegetable Oils Transesterification with Ethanol in the Presence of Metal Oxides. *Kemija u industriji*. 2020. № 69. P. 365-370. doi: 10.15255/KUI.2019.059.
15. Melnyk Yu., Starchevskiy R., Melnyk S. Transesterification of sunflower oil triglycerides by 1-butanol in the presence of d-metal oxides. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2019. № 4. P. 95-100. doi: 10.32434/0321-4095-2019-125-4-95-100.
16. Melnyk S., Starchevskyy R., Melnyk Y., Orzhekhovska O., Mahorivska H. Kinetic and technological aspects of butyloleate production in the presence of metal oxides. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. 2020. № 4(6). P. 114-121. doi: 10.20998/2413-4295.2020.04.17.
17. Yurkselen Y., Kaya A. Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils. *Engineering Geology*. 2008. № 102. P. 38-45. doi: 10.1016/j.enggeo.2008.07.002.
18. Santamaria J. C., Klein K. A., Wang Y. H., Prencke E. Specific surface: determination and relevance. *Canadian Geochemical Journal*. 2002. № 39. P. 233-241. doi: 10.1139/t01-077.
19. Wang Y., Du B., Dou X., Liu J., Shi B., Wang D., Tang H. Study on the pore surface fractal dimension and surface acid–base properties of natural particles around Guanting reservoir. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2007. № 307(1-3). P. 16–27. doi: 10.1016/j.colsurfa.2007.04.055.
20. Prélot B., Lantenois S., Nedellec Y., Lindheimer M., Douillard J.-M., Zajac J. The difference between the surface reactivity of amorphous silica in the gas and liquid phase due to material porosity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2010. № 355(1-3). P. 67–74. doi: 10.1016/j.colsurfa.2009.11.035.
21. Минакова Т. С. *Адсорбционные процессы на поверхности твердых тел*. Томск: Издательство Томского университета, 2007. 284 с.

References (transliterated)

1. Patrylak L. K., Zubenko S. O., Konovalov S. V., Povazhnyi V. A. Alkaline transesterification of sunflower oil triglycerides by butanol-1 over potassium hydroxide and alkoxides catalysts. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2019, no.5, pp. 93-103, doi:10.32434/0321-4095-2019-126-5-93-103.
2. Patryliak L. K., Zubenko S. O., Konovalov S. V. Pereesteryfikatsiia ripakovoї oliї butanolom na luzhnykh katalizatorakh. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2018, no.5, pp. 125-130, doi:10.32434/0321-4095-2019-126-5-93-103.
3. Ilgen O., Akin A. Development of Alumina Supported Alkaline Catalysts Used for Biodiesel Production. *Turkish Journal of Chemistry*, 2009, no.33, pp. 281-287, doi:10.3906/kim-0809-29.
4. Irmawati R., Shafizah I., Nur Sharina A., Abbastabar Ahangar H., Taufiq-Yap Y. H. Transesterification of Palm Oil by Using Silica Loaded Potassium Carbonate (K_2CO_3/SiO_2) Catalysts to Produce Fatty Acid Methyl Esters (FAME). *Energy and Power*, 2014, no.1(4), pp. 7-15, doi: 10.5923/j.ep.20140401.02.
5. Alsalme A., Kozhevnikova E. F., Kozhevnikov I. V. Heteropoly acids as catalysts for liquid-phase esterification and transesterification. *Applied Catalysis A: General*, 2008, no. 349(1-2), pp. 170-176, doi: 10.1016/j.apcata.2008.07.027.
6. Aziz H.A., Aroua M. K., Yusoff R., Abas N. A., Idris Z., Hassan H.A. Production of Palm-Based Esteramine Through Heterogeneous Catalysis. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2015, no.19(1), pp. 11-18, doi:10.1007/s11743-015-1736-0.
7. Bouguerra Neji S., Trabelsi M., Frikha M. Esterification of Fatty Acids with Short-Chain Alcohols over Commercial Acid Clays in a Semi-Continuous Reactor. *Energies*, 2009, no.2(4), pp. 1107-1117, doi:10.3390/en20401107.
8. Brito A., Borges M. E., Garín M., Hernández A. Biodiesel Production from Waste Oil Using Mg-Al Layered Double Hydroxide Catalysts. *Energy & Fuels*, 2009, no.23(6), pp. 2952-2958, doi:10.1021/ef801086p.
9. Caetano C. S., Guerreiro L., Fonseca I.M., Ramos A., Vital J., Castanheiro J.E. Esterification of fatty acids to biodiesel over polymers with sulfonic acid groups. *Applied Catalysis A: General*, 2009, no. 359(1-2), pp. 41-46, doi: 10.1016/j.apcata.2009.02.028.
10. Da Silva M. J., Vilanculo C.B., Teixeira M. G., Julio A. A. Catalysis of vegetable oil transesterification by Sn(II)-exchanged Keggin heteropolyacids: bifunctional solid acid catalysts. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 2017, no.122(2), pp. 1011-1030, doi:10.1007/s11144-017-1258-z.
11. Farooq M., Ramli A., Naeem A., Saleem Khan, M. Effect of different metal oxides on the catalytic activity of $\gamma-Al_2O_3$ -MgO supported bifunctional heterogeneous catalyst in biodiesel production from WCO. *RSC Advances*, 2016, no.2(6), pp. 872-881, doi:10.1039/C5RA18146A.
12. Melnyk Yu., Starchevskiy R. Heterogeneous catalytic transesterification of glycerol trioleate in the field of ultrasonic waves. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, 2016, no.42(1214), pp. 188-192, doi:10.20998/2413-4295.2016.42.30.
13. Melnyk Yu., Starchevskiy R., Melnyk S. Transesterification of triglycerides by ethanol in the presence of metal oxides. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, 2019, no.5(1330), pp. 132-138, doi: 10.20998/2413-4295.2019.05.17.
14. Melnyk Yu., Starchevskiy R., Melnyk S. Technological Aspects of Vegetable Oils Transesterification with Ethanol in the Presence of Metal Oxides. *Kemija u industriji*, 2020, no.69, pp. 365-370, doi:10.15255/KUI.2019.059.
15. Melnyk Yu., Starchevskiy R., Melnyk S. Transesterification of sunflower oil triglycerides by 1-butanol in the presence of d-metal oxides. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2019, no.4, pp. 95-100, doi:10.32434/0321-4095-2019-125-4-95-100.
16. Melnyk S., Starchevskyy R., Melnyk Y., Orzhekhovska O., Mahorivska H. Kinetic and technological aspects of butyloleate production in the presence of metal oxides. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*, 2020, no.4(6), pp. 114-121, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.17.
17. Yurkselen Y., Kaya A. Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils. *Engineering Geology*, 2008, no.102, pp. 38-45, doi: 10.1016/j.enggeo.2008.07.002.
18. Santamaria J. C., Klein K. A., Wang Y. H. Prencke E. Specific surface: determination and relevance. *Canadian Geochemical Journal*, 2002, no.39, pp. 233-241, doi: 10.1139/t01-077.
19. Wang Y., Du B., Dou X., Liu J., Shi B., Wang D., Tang H. Study on the pore surface fractal dimension and surface acid-base properties of natural particles around Guanting reservoir. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007, no.307(1-3), pp. 16-27, doi: 10.1016/j.colsurfa.2007.04.055.
20. Prélot B., Lantenois S., Nedellec Y., Lindheimer M., Douillard J.-M., Zajac J. The difference between the surface reactivity of amorphous silica in the gas and liquid phase due to material porosity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2010, no.355(1-3), pp. 67-74, doi:10.1016/j.colsurfa.2009.11.035.
21. Minakova T. S. *Adsorbcionnye processy na poverhnosti tverdyh tel*. Tomsk. Izdatel'stvo Tomskogo universiteta, 2007, 284 p.

Відомості про авторів (About authors)

Мельник Юрій Романович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри технології органічних продуктів; тел.: (067) 391-09-20; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0109-5526>, e-mail: yurii.r.melnyk@lpnu.ua.

Yurii Melnyk – Candidate of Technical Sciences, Docent, Lviv Polytechnic National University, Associate Professor at the Department of Organic Products Technology; tel.: (067) 391-09-20; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0109-5526>, e-mail: yurii.r.melnyk@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.

Stepan Melnyk – 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.

Магорівська Галина Ярославівна – кандидат технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри хімічної технології силікатів; тел.: (067) 832-83-40; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3609-7970>, e-mail: halyna.y.mahorivska@lpnu.ua.

Halyna Mahorivska – Candidate of Technical Sciences, Lviv Polytechnic National University, Associate Professor at the Department of Chemical Technology of Silicate Materials; tel.: (067) 832-83-40; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3609-7970>, e-mail: halyna.y.mahorivska@lpnu.ua.

Реутський Віктор Володимирович – доктор технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри технології органічних продуктів; тел.: (067) 670-81-88; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7388-1115>, e-mail: victor.v.reutskyi@lpnu.ua.

Viktor Reutskyi – Doctor of Technical Sciences, Lviv Polytechnic National University, Associate Professor at the Department of Organic Products Technology; tel.: (067) 670-81-88; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7388-1115>, e-mail: victor.v.reutskyi@lpnu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Мельник Ю. Р., Мельник С. Р., Магорівська Г. Я., Реутський В. В. Вплив властивостей оксидів металів на трансестерифікацію тригліцеридів олій етанолом та бутан-1-олом. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 113-120. doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.16.

Please cite this article as:

Melnyk Yu., Melnyk S., Mahorivska H., Reutskyi V. Effect of physicochemical properties of d-metal oxides on sunflower oil transesterification. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 101-112, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.16.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Мельник Ю. Р., Мельник С. Р., Магоривская Г. Я., Реутский В. В. Влияние свойств оксидов металлов на переэтерификацию триглицеридов растительных масел этанолом и бутан-1-олом. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 101-112. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.16.

АННОТАЦІЯ *Исследованы физико-химические свойства оксидов d-металлов (NiO, CuO, MnO, FeO, PbO, ZnO), которые являются гетерогенными катализаторами процесса переэтерификации триглицеридов подсолнечного масла этанолом и бутан-1-олом. Для этих оксидов определены доступная удельная поверхность, поверхностные кислотность и основность и изменение водородного потенциала суспензии катализатора в воде. Доступная удельная поверхность оксидов определена титрованием их водной суспензии раствором метиленового синего с известной концентрацией, а их поверхностные кислотность и основность – обратным титрованием образцов, обработанных водным раствором аммиака и уксусной кислоты, соответственно. Установлено, что все исследованные оксиды d-металлов имеют низкую удельную площадь поверхности – ее значение находится в пределах 0,6–1,5 м²/г. Поверхностная кислотность и основность указанных катализаторов составляет 0,13–0,27 ммоль/г и 0,019–0,066 ммоль/г, соответственно. Показано, что изменение водородного потенциала водной суспензии исследованных катализаторов относительно pH дистиллированной воды имеет наибольшее значение для NiO и ZnO и составляет 0,6–0,65, тогда как для CuO это изменение составляет всего 0,3. Характер кривых изменения pH и значение pH суспензии оксидов в состоянии равновесия свидетельствуют о том, что для исследованных катализаторов характерно наличие слабых кислотных центров. Указанные характеристики катализаторов сопоставлены с результатами, полученными в процессе переэтерификации триглицеридов подсолнечного масла этанолом и бутан-1-олом. Установлено, что наблюдается корреляция между поверхностной кислотностью катализатора и начальной скоростью реакции переэтерификации триглицеридов этанолом и бутан-1-олом. В то же время такая корреляция отсутствует для поверхностной основности исследованных оксидов металлов, что согласуется с данными о катализе реакции переэтерификации триглицеридов только сильными основными активными центрами. Сделан вывод, что реакция переэтерификации триглицеридов подсолнечного масла этанолом и бутан-1-олом происходит прежде всего на слабых кислотных центрах оксидов d-металлов.*

Ключевые слова: *переэтерификация; оксиды металлов; удельная поверхность; поверхностная кислотность; поверхностная основность*

Надійшла (received) 01.05.2021

УДК 504.062.2

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.17

ПЕРЕРОБКА ТА УТИЛІЗАЦІЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

Н. М. САМОЙЛЕНКО, В. Д. КАТЕНІН*, А. О. БАРАНОВА

кафедра хімічної техніки та промислової екології, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: vadimkatenin1@gmail.com

АНОТАЦІЯ Проаналізовано стійку тенденцію нарощування встановленої потужності сонячних електростанцій, що супроводжується поступовим накопиченням відходів сонячних панелей. Визначено основні чинники негативного впливу на довкілля і здоров'я людини виробництва сонячних фотоелектричних панелей та їх відходів. Проаналізовані сценарії накопичення відходів фотоелектричних модулів, охарактеризовані особливості утворення та накопичення відходів у теперішній час та у перспективі. З урахуванням терміну середньої експлуатації сонячних фотоелектричних панелей у 25 років, визначено, що обсяги відходів будуть помітно збільшуватися у період 2030...2035 рр., досягаючи піку між 2040 та 2050 рр. Охарактеризовано тип та склад фотоелектричних панелей, які визначають суть технології переробки відходів. Визначено, що на сьогодні більшість досліджень з переробки відходів сонячних фотоелектричних панелей зосереджено на модулях першого покоління, що пов'язується з масштабами експлуатації даних панелей та ринками продажу. З'ясовано, що у теперішній час виробництво сонячних фотоелектричних панелей, в якому витрачаються первинні природні матеріали, є досить природоємним, а безпосередньо переробка відходів не може задовольнити потреби виробництва фотоелектричних модулів. Обґрунтовується об'єктивна необхідність проведення у великих обсягах видобування корисних копалин та використання запасів цінних металів до настання періоду високоефективної переробки відходів сонячних фотоелектричних панелей, які б відповідали запитам виробництва. Розглянуті сучасні тенденції у технологічних дослідженнях і розробках вторинної переробки фотоелектричних модулів. Визначено, що по мірі збільшення обсягів виробництва сонячних фотоелектричних панелей і утворення відходів, вимоги щодо забезпечення природозберігаючої ефективності технологій переробки та утилізації відходів повинні бути більш жорсткими. Це передбачає підвищення ступеню переробки основних компонентів відходів, починаючи з 80...90 % і до максимально високого рівня. Визначено, що водночас з даною тенденцією, доцільно проводити розробку технологій утилізації не перероблювальних у теперішній час частин відходів.

Ключові слова: відходи сонячних фотоелектричних панелей; вплив на довкілля; накопичення відходів; переробка; утилізація

PROCESSING AND RECYCLING OF PHOTOVOLTAIC SOLAR PANELS

N. SAMOILENKO, V. KATENIN, A. BARANOVA

Department of chemical engineering and industrial ecology, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The steady tendency of increasing the installed capacity of solar power plants, which is accompanied by the gradual accumulation of solar panel waste, is analyzed. The main factors of negative impact on the environment and directly on human health from the production of solar photovoltaic panels and waste of these panels are identified. The scenarios of solar photovoltaic panels waste accumulation are analyzed, the specifics of waste generation and accumulation in the present and in the future are characterized. Taking into account the average service life of solar photovoltaic panels in 25 years, it is determined that the amount of waste will increase significantly in the period of 2030...2035, reaching a peak between 2040 and 2050. The type and composition of photovoltaic panels, which determine the essence of waste processing technology, are characterized. It is defined that today most research on waste recycling of solar photovoltaic panels focuses on the first generation of modules, which is associated with the scale of operation of these panels and sales markets. It was found that at present, the production of solar photovoltaic panels, which consumes primary natural materials, is characterized by nature intensity, and direct waste processing cannot meet the needs of the photovoltaic modules production. The objective necessity of carrying out large-scale extraction of minerals and use of precious metals before the period of highly efficient processing of waste solar photovoltaic panels, which would meet the demands of production, is substantiated. Modern tendencies in technological researches and developments of secondary processing of photovoltaic modules are considered. It is determined that as the volume of solar photovoltaic panels production and waste generation increases, the requirements for ensuring the environmental efficiency of waste processing and disposal technologies should be more stringent. This involves increasing the recycling degree of the waste's main components, starting from 80...90 % and to the highest possible level. It is determined that at the same time with this tendency, it is expedient to develop technologies for recycling of non-recyclable parts of waste at present.

Keywords: solar photovoltaic panels waste; environmental impact; waste accumulation; processing; recycling

Вступ

Сучасний розвиток енергетики характеризується активним використанням відновлюваних джерел енергії. За прогнозами до 2050 р. буде здійснено 100 % перехід до використання

відновлювальної енергетики, причому частка сонячної енергетики складатиме 69 % [1]. Вже до кінця 2018 року загальна встановлена потужність сонячних фотоелектричних батарей досягла 480 ГВт, що є другим за величиною відновлюваним джерелом електроенергії після вітру [2]. У 2020 р. встановлена

потужність вітряних та сонячних електростанцій зросла на 41 %, а їх частка у структурі виробництва енергії – удвічі. Водночас найбільше підвищилась встановлена потужність сонячних електростанцій [3].

Стрімкий розвиток сонячної фотоенергетики супроводжується поступовим накопиченням відходів – сонячних панелей, які відпрацювали свій термін або вийшли з експлуатації за інших причин. Сценарії накопичення відходів показують, що у 2050 році у світі утвориться 78 млн тон відходів від фотоелектричних модулів [4].

З екологічної точки зору виробництво сонячних фотоелектричних панелей (СФП) та їх відходи розглядають як чинник, що негативно впливає на елементи довкілля. Несприятлива дія цієї сфери пов'язується з використанням земельних та водних ресурсів, шкідливих матеріалів, а також викидами забруднюючих речовин, серед яких суттєвим є викид CO₂, що впливає на зміну клімату [5]. Окремою екологічною проблемою є виснаження природних ресурсів при видобуванні мінеральної сировини, у т.ч. металів, що використовуються для виготовлення фотоелектричних панелей.

Відходи фотоелектричних панелей можуть містити важкі метали і їх сполуки, а також телур, галій, сірку тощо. Зазначені забруднюючі речовини та їх з'єднання, які потрапляють у довкілля, приводять до виникнення різних патологічних станів організму людини та тварин. Так, наприклад кадмій негативно впливає на клітини мозку, легенів тощо; свинець знижує індекс інтелектуального розвитку, викликає серцево-судинні захворювання і захворювання нирок та ін.

Нині в Україні відсутні підприємства з переробки фотоелектричних модулів, як і вимоги щодо їх утилізації [4]. Водночас у розвинених країнах світу давно розроблені та практично застосовуються технології утилізації сонячних панелей.

Зважаючи на зазначене, важливим науковим і практичним завданням є дослідження, направлені на аналіз та оцінку технологій утилізації відходів сонячних панелей, поводження з якими в Україні вже незабаром стане значною екологічною проблемою.

Мета роботи

Метою роботи є аналіз утворення відходів сонячних фотоелектричних панелей і технологій переробки та утилізації цих відходів, а також виявлення тенденцій підвищення екологічності поводження з ними.

Для досягнення поставленої мети будуть вирішені наступні задачі:

1. Охарактеризувати процес утворення та накопичення відходів сонячних фотоелектричних панелей у теперішній час та на перспективу.

2. Розглянути сучасні тенденції у технологічних дослідженнях і розробках для вторинної переробки фотоелектричних модулів.

3. Проаналізувати екологічні аспекти переробки та утилізації відходів сонячних фотоелектричних панелей.

4. Визначити тенденції зменшення природоємності технологій виробництва СФП та розробки нових технологій переробки і утилізації відходів.

Виклад основного матеріалу

Утворення та накопичення відходів СФП.

Технології переробки безпосередньо залежать від типу та складу панелей. У теперішній час розрізняють три покоління фотоелектричних панелей:

1. Перше покоління: панелі на основі кристалічного кремнію (c-Si) включають моно- та полікристалічні;

2. Друге покоління: тонкоплівкові панелі на основі аморфного кремнію (a-Si), телуриду кадмію (CdTe), діселеніду міді індію (CIS); селеніду мідного індію галію (CIGS);

3. Третє покоління представлено фотоелектричними концентраторами (CPV) та новими технологіями, що включають панелі на основі CPV-кремнію або III-V сполук; сонячні елементи, сенсibiliзовані фарбами, органічні сонячні елементи, а також тандемні/гібридні комірки (органічні та неорганічні напівпровідники) та кремній – PERC.

Очікується, що у майбутньому ринок СФП значною мірою зміниться. Частка панелей першого покоління до 2030 року зменшиться з 92% до 44,8%, а панелі третього покоління, як передбачається, будуть складати 44,1% [6].

У теперішній час покомпонентний склад СФП характеризується неузгодженістю. Є очевидним, що в міру того як розвиваються нові технології, частка таких компонентів як срібло, кремій та алюміній у складі панелей буде зменшуватись, а природоохоронний ресурсозберігаючий ефект – збільшуватись.

Більшість дослідницької літератури зосереджується на переробці фотоелектричних модулів першого та другого поколінь [7,8]. Водночас відмічається, що переважна більшість таких досліджень присвячена переробці кремнієвих (c-Si) фотоелектричних модулів першого покоління (переважно полікристалічних), які становлять 85...95% встановлених панелей з початку 1990-х рр., а в деяких країнах – початку 1980-х рр. Донедавна панелі CIGS та CdTe склали відповідно 2% та 5% частки ринку продажів сонячних панелей у всьому світі [2,7].

Важливим для прогнозування сценарію утворення відходів СФП є визначення терміну використання панелей. Літературні дані свідчать про різний підхід щодо терміну експлуатації панелей. Середнім діапазоном між 30-річним та 20-річним терміном, які зустрічаються у джерелах інформації, є 25 років [7,9,10]. З урахуванням цих даних та відповідно до світової тенденції, відходи

панелей починають помітно збільшуватися у період 2030...2035 рр., досягаючи піку між 2040 і 2050 рр.

Згідно джерел інформації, кількість відходів сонячних панелей у 2016 році склала 1,7 млн т, у 2030 році ця цифра сягне 8 млн т, а у 2050 складатиме 60 – 78 млн т [7].

Тенденції в технологічних дослідженнях та розробках вторинної переробки фотоелектричних модулів

Технологічні дослідження і розробки щодо переробки фотоелектричних модулів у деяких країнах проводяться вже 20 і більше років. Мотивація досліджень та розробки конструкцій відповідає змінам, що відбуваються в технологіях виробництва СФП.

Автором [11] досліджені зміни мотивації переробки фотоелектричних модулів у період 1990-2010 рр. Спочатку переробка c-Si була спрямована на відновлення Si-елементів/пластин, згодом – на відновлення Ag через високу цінність, а також витяг Pb через екологічні причини. У другій половині 2000 рр. екологічні питання стосувались відновлення скла з метою підвищення ефективності використання мінеральних ресурсів. Період з 2010 р. характеризується аналізом як екологічної, так і економічної ефективності відновлення скла та інших цінних компонентів.

Щодо фотоелектричних модулів на основі сполук CdTe та CIGS, то період 1990 рр. визначався розробками екологічної направленості (відновлення небезпечних матеріалів – Cd, Se та відновлення рідкісних металів (Te та In), через потенційний брак ресурсів. Друга половина 2000 рр., як і у випадку модулів c-Si, визначалась екологічними питаннями відновлення скла з метою підвищення ефективності використання мінеральних ресурсів.

Рушійною силою інновацій з періоду 2010 рр. є відновлення як важких компонентів, таких як скло, так і легких напівпровідникових металів/шарів з меншими витратами та з більшою швидкістю. Необхідно вирішити проблему збільшення якості відновлених матеріалів для поліпшення їх вторинного використання.

Таким чином, майже кожен період розробки технологій переробки відходів визначався ресурсоощадливою складовою та вирішенням екологічних питань. По мірі збільшення обсягів випуску СФП та утворення відходів вимоги до створення технологій переробки та утилізації відходів зростають і повинні стати більш жорсткими з точки зору природозберігаючої ефективності.

На рис. 1 приведений принциповий процес переробки фотоелектричного модуля, який включає грубу та тонку переробку:

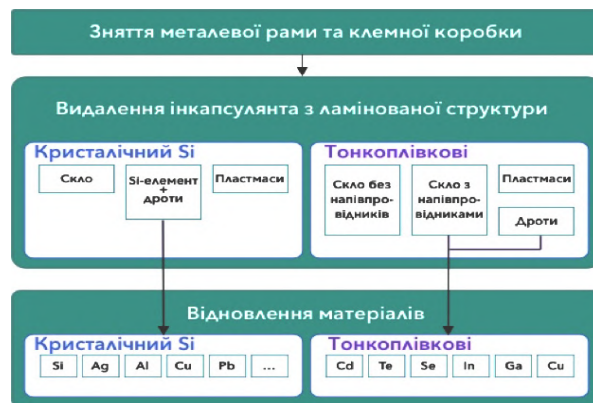


Рис. 1 – Принциповий процес переробки фотоелектричного модуля

Сучасні дослідження та розробки переробки та утилізації фотомодулів c-Si включають зняття металевої рами та клемної коробки. Проте видалення герметика з ламінованих структур залишається найбільш складним процесом. Застосовують термічний, механічний, хімічний та механічний у поєднанні з термічним і хімічним методи. Відновлення металів з Si-елементів проводиться травленням, застосуванням електролізу та іншими, в основному, шкідливими для довкілля способами.

У сучасних розробках щодо переробки фотоелектричних модулів на основі сполук для видалення інкапсулянта використовується термічний, механічний та механічний у поєднанні з термічним та хімічним методом, а також оптичний метод. Водночас найбільш перспективним є останній метод лазерного застосування.

Екологічні аспекти переробки та утилізації відходів фотоелектричних панелей.

Життєвий цикл сонячних фотоелектричних модулів супроводжується негативним впливом на елементи довкілля та людину. При виробництві СФП відбувається забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів [12]. Потрапляння забруднених відходів («e-waste») на сховища приводить до просочування токсичних речовин у ґрунт.

Типова СФП з кристалічного кремнію c-Si, яка займає 95% світового ринку, містить 76% скла, 10% полімера, 8% алюмінію, 5% кремнію, 1% міді та менше 0,1% срібла та інших елементів (олова, свинцю). Для тонкоплівкових технологій CdTe та CIGS потрібно менше матеріалу. Панель CdTe складається із 96...97% скла, 3...4 % полімеру та менше 1% напівпровідникових металів (нікель, олово, цинк). CIGS містить біля 88...89% скла, 7% алюмінію, 4% полімеру та менше 1% напівпровідникового матеріалу (індій, галій) [13].

У теперішній час технології переробки відходів дозволяють вилучити 80...90% напівпровідникових матеріалів та скла. При цьому до особливо цінних матеріалів панелей відносяться срібло, індій, телур,

силіцій. Також при переробці може бути вилучено свинець, олово, мідь, алюміній та ін.

Повний рециклінг та утилізація матеріалів СФП являє собою проблему, адже, наприклад, скло, з якого в основному складається панель, містить шкідливі домішки (кадмій, свинець, селен), тому переробка такого матеріалу простими способами викликає труднощі.

Зрозуміло, що мінімізація негативного впливу на довкілля відходів СФП може бути здійснена шляхом більш повної переробки відходів з максимальним вилученням корисних компонентів і зниження таким чином попиту на первинну сировину. Водночас актуальними є питання утилізації частин та елементів фотоелектричної панелі, які не можуть бути використані в основній технології переробки відходів.

Слід зазначити, що у теперішній час виробництво СФП, в якому витрачаються первинні природні матеріали, є природоємним. Переробка відходів не може задовільнити потреби виробництва фотоелектричних модулів і необхідно проводити подальші розробки корисних копалин у великих обсягах. Так, наприклад, для вилучення 50...90 г чистого кремнію необхідно переробити 1 т піску. У процесі розробок основних металів проходить забруднення водних ресурсів, ґрунтів важкими металами.

Обговорення результатів

Розвиток відновлювальної енергетики в останні роки характеризується нарощуванням потенціалу використання сонячних фотоелектричних систем. На виготовлення фотоелектричних модулів витрачається велика кількість матеріалів, які або виробляються із природної сировини або є супутніми продуктами переробки руд кольорових металів (кадмій, індій, галій, частково селен, телур). Нині фотоелектричні модулі споживають багато матеріалів, наприклад, до 40% телура, який пропонується ринком використовується у виробництві СФП [14].

Попит на кобальт, літій, нікель можуть перевищити запаси цих металів, а індію, срібла, телуру досягають 50% таких запасів. Геологічні поклади мінеральної сировини напівпровідникових металів визначаються як досить обмежені і це у майбутньому може стати проблемою виробництва СФП [15].

Сценарії накопичення відходів вказують, що утворення відходів СФП досягне максимального обсягу у порівнянні з теперішнім часом тільки через 25...30 років. Ймовірно, що у цей час можливо прогнозувати найбільш суттєве зменшення негативного впливу на довкілля від використання природної сировини шляхом повного циклу переробки відходів СФП.

Дотепер основні технології переробки відходів фотоелектричних панелей в середньому дозволяють досягти 80...90% рівня переробки. Зважаючи на це,

досить значну роль можуть мати способи утилізації частин (елементів) панелей, які не включаються у даний цикл переробки.

Висновки

1. Сонячна енергетика є вагомим напрямком розвитку відновлювальної енергії і джерелом утворення відходів СФП, обсяги яких будуть постійно зростати і у порівнянні з нинішнім часом досягнуть максимальних величин приблизно до 2050 р. У даний період за рахунок розробки досконалих технологій переробки та утилізації відходів СФП ймовірно суттєве зменшення використання природної сировини та, як наслідок, видобутку мінеральних ресурсів, порушення земель від гірничих робіт, а також забруднення елементів довкілля.

2. Переробка відходів СФП потребує розробки нових технологій та удосконалення існуючих, що передбачає максимальне вилучення корисних компонентів і, таким чином, зниження попиту на первинну сировину. При цьому при переробці відходів ставляться вимоги щодо підвищення якості одержаних матеріалів. Це у більшості випадків унеможливає в єдиному процесі переробити усі частини відходів фотоелектричних панелей, що складаються з однойменних компонентів. Зважаючи на дані умови, доцільним є проведення розробок технологій утилізації неперероблювальних матеріалів даних відходів, що можуть бути застосовані у неенергетичній сфері.

Список літератури

1. Global energy system based on 100 % renewable energy on power sector. URL: <http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/Full-Study-100-Renewable-Energy-Worldwide-Power-Sector-1.pdf> (дата звернення: 11.04.2021).
2. IRENA. *Future of solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects* (A Global Energy Transformation: paper). Abu Dhabi. International Renewable Energy Agency. 2019. 73 pp.
3. Укренерго. URL: <https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-ayihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi-vdvichi> (дата звернення: 11.04.2021).
4. Pundiev V., Rieztsov V., Surzhyk T., Shevchuk V., Sheiko S. Disposal of photovoltaic modules. Problems and international experience. *Vidnovlyvana Energetika*. 2019. № 4(59). P. 29-36. doi: 10.36296/1819-8058.2020.3(62).27-34
5. Stamford L., Azapagic A. Environmental impacts of copper-indium-gallium-selenide (CIGS) photovoltaics and the elimination of cadmium through atomic layer deposition. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 688. P. 1092-1101. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.343.
6. Chowdhury R., Apul D., Fry T. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. *Resources, Conservation and Recycling*. 2010. Vol. 54. Issue 4. P. 250-255. doi: 10.1016/j.resconrec.2009.08.007.

7. Weckend Stephanie, Wade Andreas, Heath Garvin A. End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels. *United States*. 2016. doi: 10.2172/1561525.
8. Tsang M., Sonnemann G., Bassani D. Life-cycle assessment of cradle-to-grave opportunities and environmental impacts of organic photovoltaic solar panels compared to conventional technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016. № 156. P. 37-48.
9. Kang D., White T. P., Thomson A. PV Module Recycling: Mining Australian Rooftops. 2015. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/PV-Module-Recycling%3A-Mining-Australian-Rooftops-Kang-White/d3237168273b50ce782fa85368d2cc18fd37eb5d> (дата звернення: 13.04.2021).
10. First Solar Recycling Recovers up to 90% of materials: First Solar. URL: <https://www.firstsolar.com/en/Modules/Recycling> (дата звернення: 11.04.2021).
11. Komoto Keiichi, Lee Jin-Seok, Zhang Jia, Ravikumar Dwarakanath, Sinha Parikhit, Wade Andreas, Heath Garvin A. End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies. *United States*. 2018. doi: 10.2172/1561523.
12. Tawalbeh M., Al-Othman A., Kafiah F., Abdelsalam E., Almomani F., Alkasrawi M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 759. 143528. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143528.
13. Giurco D., Dominish E., Florin N., Watari T., McLellan B. Requirements for Minerals and Metals for 100% Renewable Scenarios. In: Teske S. (eds) *Achieving the Paris Climate Agreement Goals*. Springer, Cham. 2020, P. 437-457. doi: 10.1007/978-3-030-05843-2_11.
14. Grandell L., Höök M., Assessing Rare Metal Availability Challenges for Solar Energy Technologies. *Sustainability*. 2015. 7. 11818-11837. doi: 10.3390/su70911818.
15. Dominish E., Florin N., Teske S. Responsible minerals sourcing for renewable energy. Report prepared for Earthworks by the Institute for Sustainable Futures. *University of Technology Sydney*. 2019. 52 pp.
4. Pundiev V., Rieztsov V., Surzhyk T., Shevchuk V., Sheiko S. Disposal of photovoltaic modules. Problems and international experience. *Vidnovlavana Energetika*, 2019, no 4(59), pp. 29-36, doi: 10.36296/1819-8058.2020.3(62).27-34.
5. Stamford L., Azapagic A. Environmental impacts of copper-indium-gallium-selenide (CIGS) photovoltaics and the elimination of cadmium through atomic layer deposition. *Science of The Total Environment*, 2019, Vol. 688, pp. 1092-1101, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.343.
6. Chowdhury R., Apul D., Fry T. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, Vol. 54, Issue 4, pp. 250-255, doi: 10.1016/j.resconrec.2009.08.007.
7. Weckend Stephanie, Wade Andreas, Heath Garvin A. End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels. *United States*, doi: 10.2172 / 1561525.
8. Tsang M., Sonnemann G., Bassani D. Life-cycle assessment of cradle-to-grave opportunities and environmental impacts of organic photovoltaic solar panels compared to conventional technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, no 156, pp. 37-48.
9. Kang D., White T. P., Thomson, A. PV Module Recycling: Mining Australian Rooftops. 2015. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/PV-Module-Recycling%3A-Mining-Australian-Rooftops-Kang-White/d3237168273b50ce782fa85368d2cc18fd37eb5d> (accessed 13.04.2021).
10. First Solar Recycling Recovers up to 90% of materials: First Solar; Available at: <https://www.firstsolar.com/en/Modules/Recycling> (accessed 13.04.2021).
11. Komoto Keiichi, Lee Jin-Seok, Zhang Jia, Ravikumar Dwarakanath, Sinha Parikhit, Wade Andreas, Heath Garvin A. End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies. *United States*, 2018, doi: 10.2172/1561523.
12. Tawalbeh M., Al-Othman A., Kafiah F., Abdelsalam E., Almomani F., Alkasrawi M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. *Science of The Total Environment*, 2021, Vol. 759, 143528, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143528.
13. Giurco D., Dominish E., Florin N., Watari T., McLellan B. Requirements for Minerals and Metals for 100% Renewable Scenarios. In: Teske S. (eds) *Achieving the Paris Climate Agreement Goals*. Springer, Cham. 2020, pp. 437-457, doi: 10.1007/978-3-030-05843-2_11.
14. Grandell L., Höök M., Assessing Rare Metal Availability Challenges for Solar Energy Technologies. *Sustainability*, 2015, 7, 11818-11837, doi: 10.3390/su70911818.
15. Dominish E., Florin N., Teske S. Responsible minerals sourcing for renewable energy. Report prepared for Earthworks by the Institute for Sustainable Futures. *University of Technology Sydney*, 2019. 52 p.

References (transliterated)

1. Global energy system based on 100% renewable energy on power sector. URL: <http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/Full-Study-100-Renewable-Energy-Worldwide-Power-Sector-1.pdf> (access date: 11.04.2021).
2. IRENA. *Future of solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects* (A Global Energy Transformation: paper). Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. 2019. 73 pp.
3. Ukrrengo. Available at: <https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi- vdvichi/> (accessed 11.04.2021).
13. Giurco D., Dominish E., Florin N., Watari T., McLellan B. Requirements for Minerals and Metals for 100% Renewable Scenarios. In: Teske S. (eds) *Achieving the Paris Climate Agreement Goals*. Springer, Cham. 2020, pp. 437-457, doi: 10.1007/978-3-030-05843-2_11.
14. Grandell L., Höök M., Assessing Rare Metal Availability Challenges for Solar Energy Technologies. *Sustainability*, 2015, 7, 11818-11837, doi: 10.3390/su70911818.
15. Dominish E., Florin N., Teske S. Responsible minerals sourcing for renewable energy. Report prepared for Earthworks by the Institute for Sustainable Futures. *University of Technology Sydney*, 2019. 52 p.

Відомості про авторів (About authors)

Самойленко Наталія Миколаївна – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри хімічної техніки та промислової екології; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-0306-8425; e-mail: samoilenko@kpi.kharkov.ua

Nataliia Samoilenko – PhD, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", professor of the department of chemical engineering and industrial ecology, Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0306-8425; e-mail: samoilenko@kpi.kharkov.ua

Катенін Вадим Дмитрович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6609-2652; e-mail: vadimkatenin1@gmail.com

Vadym Katenin – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", post-graduate student of the department of chemical engineering and industrial ecology, Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6609-2652; e-mail: vadimkatenin1@gmail.com

Баранова Антоніна Олегівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ст. викладач кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1079-7856; e-mail: baranovaa647@gmail.com.

Antonina Baranova – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior lecturer of department of chemical engineering and industrial ecology, Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1079-7856; e-mail: baranovaa647@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Самойленко Н. М., Катенін В. Д., Баранова А. О. Переробка та утилізація фотоелектричних сонячних панелей. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 121-126. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.17.

Please cite this article as:

Samoilenko N., Katenin V., Baranova A. Processing and recycling of photovoltaic solar panels. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 121-126, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.17.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Самойленко Н. Н., Катенін В. Д., Баранова А. О. Переработка и утилизация фотоэлектрических солнечных панелей. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 121-126. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.17.

АННОТАЦИЯ Проанализировано устойчивую тенденцию наращивания установленной мощности солнечных электростанций, сопровождаемую постепенным накоплением отходов солнечных панелей. Определены основные факторы негативного влияния на окружающую среду и здоровье человека производства солнечных фотоэлектрических панелей и их отходов. Проанализированы сценарии накопления отходов фотоэлектрических модулей, охарактеризованы особенности образования и накопления отходов в настоящее время и в перспективе. С учетом срока средней эксплуатации солнечных фотоэлектрических панелей в 25 лет, определено, что объемы отходов будут заметно увеличиваться в период 2030...2035, достигая пика между 2040 и 2050 годами. Охарактеризовано тип и состав фотоэлектрических панелей, которые определяют суть технологии переработки отходов. Определено, что сегодня большинство исследований по переработке отходов солнечных фотоэлектрических панелей сосредоточено на модулях первого поколения, что связано с масштабами эксплуатации данных панелей и рынками продаж. Выяснено, что в настоящее время производство солнечных фотоэлектрических панелей, в котором расходуются первичные природные материалы, является достаточно природоохраняющим, а непосредственно переработка отходов не может удовлетворить потребности производства фотоэлектрических модулей. Обосновывается объективная необходимость проведения в больших объемах добычи полезных ископаемых и использования запасов ценных металлов до наступления периода высокоэффективной переработки отходов солнечных фотоэлектрических панелей, отвечающих запросам производства. Рассмотрены современные тенденции в технологических исследованиях и разработках вторичной переработки фотоэлектрических модулей. Определено, что по мере увеличения объемов производства солнечных фотоэлектрических панелей и образования отходов, требования по обеспечению природосберегающей эффективности технологий переработки и утилизации отходов должны быть более жесткими. Это предполагает повышение степени переработки основных компонентов отходов, начиная с 80...90 % и до максимально высокого уровня. Определено, что одновременно с этой тенденцией, целесообразно проводить разработку технологий утилизации не перерабатываемых в настоящее время частей отходов.

Ключевые слова: отходы солнечных фотоэлектрических панелей; влияние на окружающую среду; накопление отходов; переработка; утилизация

Надійшла (received) 28.04.2021

УДК 664.696.9

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.18

ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕЦЕПТУРНОГО СКЛАДУ ЗЕРНОВИХ БАТОНЧИКІВ ТА АНАЛІЗ РИНКУ

К. А. ЧОРНЕЙ, Д. О. ТИМЧАК, С. Ю. МИКОЛЕНКО

кафедра технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, УКРАЇНА
e-mail: summer90821@gmail.com

АНОТАЦІЯ Досліджено ринок безглютенових зернових батончиків як харчових концентратів та перспективних харчових продуктів з дієтичними властивостями. Асортимент зернових батончиків складає 12% від загальної кількості харчових концентратів в Україні, з яких лише 1% належить зерновим батончикам на основі безглютенової сировини. Встановлено, що основним компонентом як вітчизняних, так і закордонних батончиків є різні продукти переробки зерна. Проаналізовано асортимент зернових батончиків вітчизняного та закордонного виробництва з точки зору їх компонентного складу та позиціонування на ринку, який класифіковано на чотири групи: батончики, збагачені вітамінами; батончики з додаванням ароматизаторів і консервантів; батончики із заміниками цукру, популярні серед вітчизняних виробників; батончики з додаванням пальмової олії, характерні для експортної продукції. Виявлено, що зернові батончики вітчизняних виробників характеризуються введенням насіння льону, чіа, амаранту, гарбуза, конопель та продуктів його переробки у рецептурі безглютенових батончиків, але в невеликих кількостях. Встановлено, що додавання сухофруктів та ягід, таких як вишня, журавлина, абрикоси та виноград, також популярне серед вітчизняних виробників. Показано, що переважна більшість вітчизняних виробників використовують суміш з чотирьох видів злакових пластівців в якості зернової основи, а саме: вівсяні, пшеничні, ячмінні та кукурудзяні пластівці. Враховуючи потребу в альтернативних зернових ресурсах для оздоровчих батончиків, продукти переробки зерна сорго, амаранту, льону виступають перспективною сировиною для розроблення безглютенової продукції. Досліджено вплив нетрадиційної сировини (поп-сорго, поп-амарант, амарантові пластівці, лляний шрот, макуха волоського горіха) на якість зернових батончиків. Підтверджено, що використання даних інгредієнтів сприяє збагаченню зернових батончиків лізином, поліфенолами, лігніном, вітамінами та основними макро- та мікроелементами. Доведено, що розроблені безглютенові зернові батончики володіють високими споживчими якостями, тому здатні відповідати зростаючому попиту на безглютенові продукти харчування серед споживачів, забезпечуючи розширення асортименту зернових батончиків на українському ринку.

Ключові слова: зерновий батончик; поп-сорго; поп-амарант; лляний шрот; якість; асортимент

PROSPECTS FOR IMPROVING THE RECIPE COMPOSITION OF GRAIN BARS AND MARKET ANALYSIS

K. CHORNEI, D. TYMCHAK, S. MYKOLENKO

Department of Agricultural Products Storage and Processing Technologies, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, UKRAINE

ABSTRACT The market for gluten-free cereal bars as food concentrates and promising food products was studied from the focus of their dietary properties and a functional purpose. The range of grain bars made up 12% of the total food concentrates market in Ukraine and only about 1% of which was devoted to gluten-free grain bars. The main component of both domestic and foreign grain bars included the various products of grain processing. The range of grain bars of domestic and foreign production was analyzed in terms of their component composition and positioning on the market, and then classified into four groups: bars enriched with vitamins; bars with added flavorings and preservatives; bars with sugar substitutes popular among domestic producers; bars with the addition of palm oil, typical for export products. The grain bars of Ukrainian producers were characterized by addition of flax, chia, amaranth, pumpkin, hemp processed products into the composition of gluten bars, but in small quantities. The addition of dried fruits and berries, such as cherries, cranberries, apricots, and grapes, was also popular among domestic manufacturers. Overwhelming majority of the domestic producers used a mixture of four types of cereal flakes as the grain base, namely: oat, wheat, barley and, corn flakes. Taking into account a need in alternative plant resources for the wholesome bars, sorghum, amaranth, flax grain processed products are excellent for the development of gluten-free products. Effect of these non-traditional raw materials (pop sorghum, pop amaranth, flax meal, walnut cake, etc.) on the quality of the grain bars was studied. The use of these ingredients contributed to the enrichment of the grain bars with essential macro- and microelements, lysine, polyphenols, lignin, and vitamins. The developed gluten-free grain bars showed the high consumer qualities; therefore, they are capable to meet the growing demand for gluten-free food products among consumers, providing to widen the range of the grain bars on the Ukrainian market.

Keywords: grain bar; pop-sorghum; pop-amaranth; flaxseed meal; quality; range of product

Вступ

Впродовж останніх років у структурі харчування населення України спостерігається стійка

нестача продуктів функціонального призначення. Проте, згідно з прогнозами провідних світових фахівців в галузі харчування та медицини, найближчим часом частка таких продуктів в

європейських країнах складатиме до 30 % загального продуктового ринку [1].

Особливе місце в сегменті функціональних харчових продуктів займають зернові батончики [2]. Зернові батончики відносяться до харчових концентратів, до складу яких входить велика кількість поживних речовин, при досить малих об'ємі й масі виробу, які добре та швидко засвоюються організмом людини.

До переваг зернових батончиків можна віднести високу енергетичну цінність, позитивний вплив на організм людини за рахунок насичення поживними речовинами та вітамінами. Даний вид продукції є відмінним та корисним сніданком чи перекусом, що чудово втамовує голод. Також, зернові батончики при споживанні поліпшують діяльність шлунково-кишкового тракту, нормалізують перистальтику кишечника. Вважається, що такі виробы сприяють оновленню метаболічних процесів в організмі людини, за рахунок наявності в продукті харчових волокон, вітамінів та мінеральних елементів, які позитивно впливають на процеси розщеплення жирів, що не тільки дозволяє підтримувати сталу масу тіла, а й зменшує рівень холестерину в крові [2,3].

До складу більшості зернових батончиків входить зернова основа – вівсяні, пшеничні та ячмінні пластівці тощо; горіхоплідна (ядра волоських горіхів, мигдаль, фундук, арахіс); плодово-ягідна (чорнослив, курага, родзинки, сушена журавлина) сировина; біологічно цінні добавки та зв'язуючий компонент. Останнім часом зацікавленість викликає використання безглютенової зернової сировини (сорго, амарант, коноплі, льон та ін.) для виробництва харчових продуктів [4–9].

Світовий ринок зернових та високобілкових батончиків у 2017 році склав 468,72 млн. доларів США. Очікується, що до 2023 р. він зросте на 3–4% [8]. При цьому продукція з високим вмістом зернових у поєднанні з фруктовими-горіховими продуктами становить 56 % від загальної частки ринку.

В Україні ринок зернових батончиків та мюслі неупинно розширюється [9]. Загребованість злакових хлібців і снєків призводить до зростання їх роздрібно́ї вартості. За статистичними даними Euromonitor [10], ціна в середньому зростає на 6 % в рік. Продажі на ринку снєків в Україні впродовж 2018–2019 рр. зросли на 6,8 %. Переважну частку торгових марок на ринку становлять вітчизняні бренди (91–95 %), але останні роки спостерігається зростання частки батончиків імпортих виробників з 4,8 % до 9 %. [10]. При цьому асортимент зернових батончиків становить 12 % від загального обсягу ринку кондитерських виробів України [11]. І тільки близько 1 % з них відводиться безглютеновим зерновим батончикам [12].

У роботі [9] вивчено компонентний склад зернових батончиків, що реалізуються у торговельних мережах м. Одеси та Одеської області; проаналізовано

наукові праці вітчизняних та іноземних вчених, які займаються розробкою нових зернових продуктів з покращеними споживними властивостями. Тучинською А.І. [13] проаналізовано ринок зернових батончиків в Україні, динаміка розширення асортименту, описана позиція українських виробників харчових концентратів на світовому ринку, але ринок безглютенових батончиків залишався поза увагою.

Основна частина наукових публікацій стосується дослідження та розробки зернових батончиків на основі вівсяних та пшеничних пластівців [14,15], насіння соняшнику, льону та продуктів їх переробки [16,17], фруктів, ягід, горіхів та патоки або цукрово-інвертного сиропу в якості зв'язуючого компоненту [18]. Ряд досліджень присвячено розробці зернових батончиків на основі пророщеного зерна пшениці як основного компоненту [19–23] та батончиків без термічної обробки [24–26]. Розроблено рецептури батончиків з додаванням насіння амаранту та висушених плодів аронії (горобини чорноплідної) [27], повітряного рису [28] та джекфрукту (індійське хлібне дерево) [29]. Р. Каур зі співавторами [30] розробили рецептуру безглютенового зернового батончика, основною якого є насіння кіноа.

Як уже зазначалося, основною складовою зернових батончиків є різні продукти переробки зерна та насіння. При цьому мало дослідженою залишається проблематика використання нетрадиційних видів сировини (сорго, амарант, льон, коноплі, волоський горіх) та продуктів її переробки [4,5,31]. Проблема забезпечення ринку продукцією для людей, які потребують спеціального харчування є актуальною, що вимагає аналізу наявного асортименту зернових батончиків і перспектив його розширення.

Мета роботи

Метою роботи є дослідження асортименту зернових батончиків вітчизняного і закордонного виробництва, а також розробка рецептур зернових батончиків із використанням нетрадиційної безглютенової сировини, а саме поп-сорго, поп-амаранту, лляного шроту.

Виклад основного матеріалу

Першим етапом дослідження було проведено аналіз асортименту зернових батончиків, що знаходяться у вільному продажі у торговельних мережах м. Дніпро (АТБ, Varus, Сільпо) та на інтернет-ресурсах (Prom.ua, Amazon.com). Проаналізовано двадцять зразків зернових батончиків різних торговельних марок та країн-виробників.

Встановлено, що маса одного батончика коливається у межах 25–40 г. У перерахунку вартості на 100 г продукту, основну частку ринку складають батончики цінового діапазону 10–50 грн. (75 %).

Вищий ціновий сегмент – 50–100 грн. і 150–250 грн. на 100 г продукту становить 15 і 10 % відповідно.

За результатами проведеного аналізу асортимент зернових батончиків вітчизняного та закордонного виробництва за компонентним складом і позиціонуванням на ринку можна поділити на чотири групи.

Перша група – батончики, збагачені вітамінами – батончик мюслі з чорницею ТМ «VITA FRUIT» (Україна), злаковий батончик з полуницею ТМ «FITNESS» (Польща), злаковий батончик з корицею ТМ «CINI MINIS» (Польща). Дана продукція позиціонується виробниками як батончики, збагачені вітамінами С, Е, РР, вітамінами групи В та фолієвою кислотою.

Друга група включає батончики з додаванням ароматизаторів та консервантів. До цієї групи відносяться: батончик мюслі з вишнею та журавлиною ТМ «Varto» (Україна), батончик мюслі з курагою ТМ «БОНО-БАР» (Україна), батончик-мюслі з чорницею ТМ «Be-fir» (Україна), батончики зернові журавлина ТМ «FitLife» (Великобританія), батончик з малиною ТМ «Fit müse» (Чехія), батончик з чорницею ТМ «OAT and Fruits» (США). В складі виробів даних торгових марок зафіксовано наявність ароматизаторів (вишня, йогурт, абрикос, чорниця та ін.) та консервантів (сорбінова кислота).

Третя група представлена батончиками із додаванням заміників цукру. На ринку такі вироби включають: батончик мюслі горіховий мікс без цукру ТМ «Fit Plan», батончик мюслі з вишнею та журавлиною ТМ «Своя лінія Fitness Bar», батончик зерновий «Крейзі конопля» ТМ «Dr.Granola», фітнес батончики-нуга «Ніжна ваніль» MAGIC GRANOLA ТМ «Dr.Granola», батончик «Гранола» ТМ «Dr.Granola», батончик «Гранола плюс» ТМ «Dr.Granola», батончик «Гранола яблуко і кориця» ТМ «Dr.Granola». Слід зазначити, що всі вироби даної групи вітчизняного виробництва. У цих зернових батончиках до складу рецептури додані такі заміники цукру як: екстракт стевії, мед, патока, фруктоза.

В останню групу виробів слід виокремити батончики із додаванням пальмової олії. До цієї групи входять реалізовані на вітчизняному ринку зернових батончиків імпортного виробництва, а саме: батончик-мюслі брусниця-малина ТМ «Tekmar» (Словаччина), спортивний батончик ТМ «Yogurt & Muesli» (Угорщина), батончик-мюслі шоколад ТМ «Müsliriegel» (Німеччина), Farmasi батончик чіа ТМ «Nutribar» (Туреччина).

Результати аналізу рецептурного складу батончиків вітчизняного та закордонного виробництва наведено у табл. 1.

Отже, асортимент батончиків на вітчизняному та закордонному ринку досить різноманітний, а рецептурний склад – багатоконпонентний. При цьому до рецептурного складу зернових батончиків вітчизняного виробництва введено насіння льону, чіа,

амаранту, гарбуза, конопель. Також досить популярним серед виробників є введення у склад батончиків сушених фруктів та ягід, наприклад вишень, журавлини, абрикос, винограду.

Таблиця 1 – Аналіз рецептур батончиків вітчизняного та закордонного виробництва

Інгредієнт	Наявність інгредієнту у рецептурах, % від проаналізованої частки ринку	
	вітчизняного виробництва	закордонного виробництва
Зернові продукти	95–100	85–90
Сушені фрукти	80–82	75–80
Горіхи	7–10	10–12
Насіння:		
- чіа	50–55	10–12
- льон	65–68	–
- кунжут	8–10	–
- коноплі	8–10	–
- соняшник	40–46	–
- гарбуз	40–46	–
- тефа	40–46	–
- кіноа	40–46	–
- амарант	40–46	–
Цукор	25–30	95–100
Замінники цукру:		
- мед	40–46	30–35
- патока	25–30	10–12
- фруктоза	9,09	–
- стевія	27,27	–
- агар-агар	9,09	–
Молоко сухе	25–30	30–35
Кульки круп'яні	40–46	20–25
Рослинна олія	25–30	85–90
Кондитерська глазур	15–20	30–35
Сіль	40–46	50–56

В якості зернової основи переважна кількість вітчизняних виробників використовують суміш злакових пластівців чотирьох видів, а саме: пластівці вівсяні, пшеничні, ячмінні та кукурудзяні. Додають також продукти екструзії – рисові або кукурудзяні кульки, які входять до складу 50 % досліджених зразків.

Варто зазначити, що зернові батончики вітчизняного виробництва рідко виготовляють глазурованими. Пояснити це можна високою калорійністю кондитерської глазури, до складу якої часто входять рослинні олії, зокрема соняшникова, ріпакова та пальмова. При цьому вітчизняні виробники все більше відмовляються від використання пальмової олії на відміну від представленої імпортною продукції [32].

У зернових батончиках вітчизняного виробництва спостерігається тенденція використання

замінників цукру, а саме фруктози, патоки, меду та екстракту стевії. Зернові батончики із використанням замінників цукру підходять для споживачів, хворих на цукровий діабет, або тих, хто слідкує за своєю фігурою та здоров'ям. На вітчизняному ринку можна зустріти зернові батончики, до складу яких входять насіння чіа, амаранту, гарбуза, льону, тефи, кіноа, конопель та ін.

Закордонні виробники дотримуються однієї концепції складання рецептури при виробництві зернових батончиків – це наявність зернової основи, горіхово-фруктової сировини, зв'язуючого компоненту та смакових добавок. Сухофрукти використовуються в 78 % досліджених зразків, горіхи – в 11 %. Цукор присутній у складі всіх досліджених зразків зернових батончиків закордонного виробництва. Також в більшості досліджених зразків використовується шоколадна глазур.

Отже, в результаті проведеного аналізу встановлено, що асортимент імпортованих зернових батончиків на українському ринку менш різноманітний порівняно з вітчизняним асортиментом. При цьому безглютенові вироби майже не представлені.

Глютен – запасний білок, який наявний в зернах злаків – пшениці, ячменю, жита. У Світі налічується близько 1% людей, яким протипоказано вживання глютенісних продуктів [32].

Сорго, амарант, льон та продукти їх переробки – відмінна альтернатива для розробки безглютенової продукції. Сорго – злакова культура, багата на вуглеводи та антиоксидантні сполуки. В 1 г зерна сорго міститься до 62 мг поліфенольних сполук [30]. Також вживання продуктів переробки сорго, сприяє синтезу жирних кислот, холестерину, стероїдних гормонів та вітамінів А і D, синтезу протеїнів та амінокислот, регуляції рівня глюкози у крові, утворенню вітаміну РР, синтезу білків. Зерно сорго багате на вітамін Н (біотин), що бере участь у синтезі глюкози, синтезі та розщепленні жирних кислот, впливає на метаболізм [30].

Зерно амаранту є багатим джерелом рослинного білка – до 18 г на 100 г СР. Також зерно амаранту багате на мінеральні сполуки (кальцій, залізо, магній, фосфор та ін.), вітаміни (А, С, Е, К, вітаміни групи В, амінокислоти (лізин) та ненасичені жирні кислоти (олеїнова, лінолева та ліноленова) [31].

Ляне насіння багате поліненасиченими жирними кислотами, які зменшують вміст холестерину в крові та вірогідність серцево-судинних захворювання. Ляне насіння та продукти його переробки багаті на лігнін, який має здатність зв'язувати естрогенні рецептори в організмі і діє як протиканцерогенний засіб [32].

Корисні властивості та відсутність глютену в зерні сорго, амаранту та льону, формують цікавість та необхідність у дослідженні можливості використання її при виробництві зернових батончиків.

Обговорення результатів

На основі проведеного аналізу літературних джерел було складено узагальнену принципову схему виробництва зернових батончиків (рис.1).

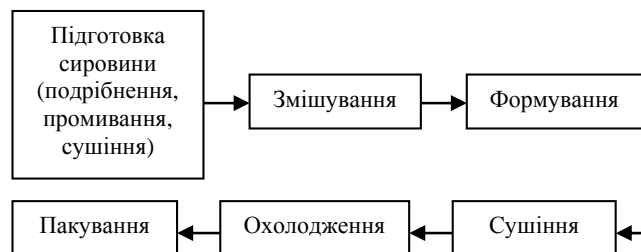


Рис. 1 – Принципова схема виробництва зернових батончиків

Було досліджено вплив нетрадиційної сировини (поп-сорго, поп-амарант, ляний шрот, макуха волоського горіха та ін.) на якість зернових батончиків, проведено органолептичну бальову оцінку з подальшим визначенням поживної (енергетичної) цінності розроблених зразків батончиків.

За наведеною вище принциповою схемою було виготовлено шість дослідних зразків безглютенових зернових батончиків з різною кількістю основних рецептурних компонентів та варіацією зв'язуючого компоненту (табл. 2.).

Таблиця 2 – Рецептурний склад безглютенових зернових батончиків

Склад	Зразки					
	1	2	3	4	5	6
Поп-сорго, г	10	18	25	10	-	12
Поп-амарант, г	-	-	-	-	40	-
Амарантові пластівці, г	10	12	20	20	-	30
Ляний шрот, г	-	10	-	5	12	-
Макуха волоського горіха, г	10	-	10	-	15	13
Кунжут, г	-	-	-	10	-	-
Горіхи, г	10	5	10	15	-	-
Сухофрукти, г	20	15	15	-	15	15
Мед, г	20	40	-	-	15	25
Пектин яблучний, г	-	-	-	-	3	5
Патока, г	-	-	20	40	-	-
Агар-агар, г	2	-	-	-	-	-
Вода, мл	18	-	-	-	-	-

Як видно з табл. 2, в якості зв'язуючого компоненту при виробництві зернових батончиків використано мед, патоку, водні розчини пектину яблучного та агар-агару. Наявність даних зв'язуючих компонентів в рецептурі зернових батончиків мала значний вплив на зовнішній вигляд та структуру готових виробів (рис. 2).

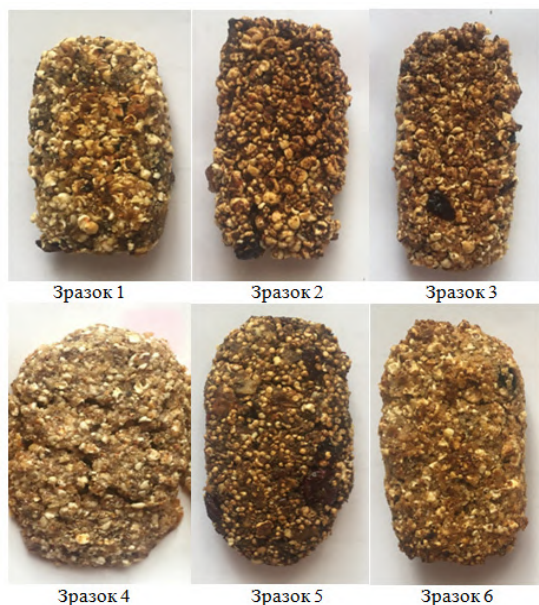
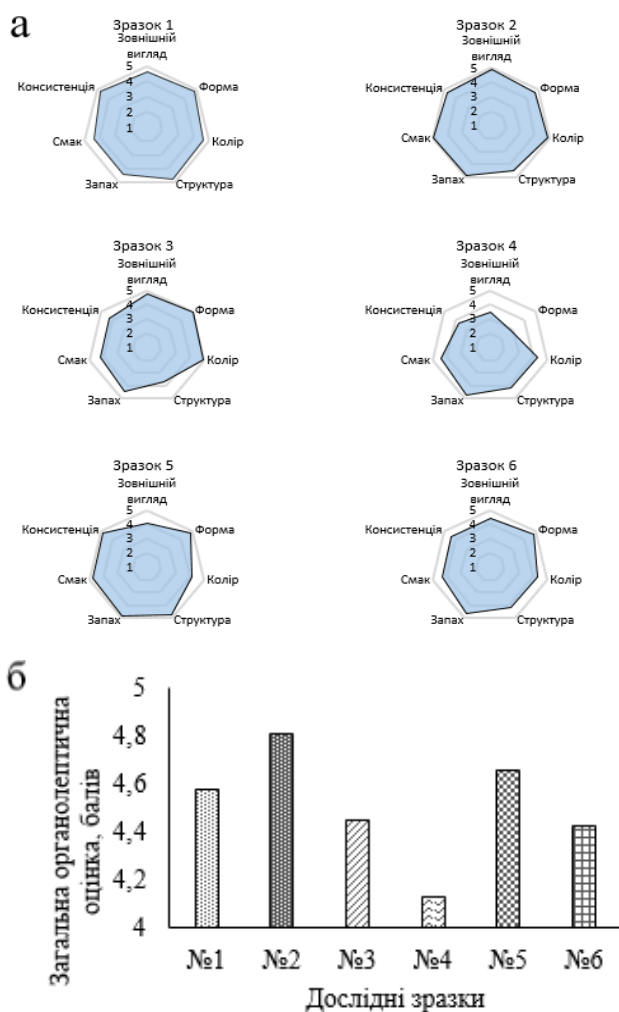


Рис. 2 – Зразки безглютенових зернових батончиків



а – профілограми показників органолептичної оцінки,
б – загальна органолептична оцінка
Рис. 3 – Органолептична оцінка дослідних зразків безглютенових зернових батончиків

Для отриманих дослідних зразків проведено балоу органолептичну оцінку (рис. 4).

За даними рис. 3а видно, що зразок 2 мав найкращий зовнішній вигляд, колір, запах та смак, але поступався зразкам 1 та 5 за структурою і консистенцією. При цьому зразок 2 отримав найвищий бал загальної органолептичної оцінки (рис. 3б), а найнижчу оцінку отримав зразок 4. Основним недоліком даного зразка був непривабливий зовнішній вигляд та розплюснута форма, що пояснюється введенням до рецептури надмірної кількості патоки в якості зв'язуючого компоненту.

Для дослідних зразків безглютенових зернових батончиків розраховано поживну та енергетичну цінність. Отримані результати наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Поживна та енергетична цінність дослідних зразків зернових батончиків

№ зразку	Вміст, %			Енергетична цінність, ккал/100 г
	білки	жири	вуглеводи	
1	7,3	13,2	44,7	318
2	7,7	7,9	64,7	348
3	9,9	14,4	56,2	383
4	9,8	17,4	55,8	408
5	10,6	17,7	55,8	414
6	8,3	11	63,2	372

Як видно з табл. 3, найбільшу енергетичну цінність мають зразки 4 та 5 – 408 та 414 ккал/100 г відповідно. Це пояснюється високим вмістом жирів в даних зразках за рахунок додавання горіхової сировини та лляного шроту, які багаті саме на жири. При цьому найнижчі показники енергетичної цінності мають зразки 1 та 2, які мають найкращі органолептичні властивості.

Отже, серед розроблених зразків безглютенових зернових батончиків найвищою якістю характеризувалися батончики з медом, агар-агаром та/або яблучним пектином замість патоки. Сумісне введення до рецептурного складу батончиків такої зернової основи, як поп-сорго, поп-амарант і лляний шрот, як побічний продукт переробки насіння льону на олію, дозволяє отримати безглютенові зернові батончики, збагачені есенціальними макро- і мікроелементами, лізином, поліфенолами, лігнінами та вітамінами. Розроблені безглютенові зернові батончики володіють високими споживчими якостями, тому така продукція має перспективи задовольнити зростаючий попит на безглютенові харчові продукти у споживачів, забезпечуючи

розширення асортименту зернових батончиків вітчизняного виробництва.

Висновки

В Україні ринок зернових батончиків неупинно розширюється. Досліджений у роботі асортимент зернових батончиків вітчизняного та закордонного виробництва за компонентним складом і позиціонуванням на ринку класифіковано на чотири групи: батончики, збагачені вітамінами; батончики з додаванням ароматизаторів і консервантів; батончики із заміниками цукру, популярні серед вітчизняних виробників; батончики з додаванням пальмової олії, характерні для експортної продукції. Особливістю зернових батончиків вітчизняного виробництва є введення до рецептурного складу глютенівих батончиків насіння льону, чіа, амаранту, гарбуза, конопель, але у незначній кількості. Зважаючи на зростання кількості людей, що страждають від непереносимості глютену, виробництву безглютенівих зернових батончиків на основі нетрадиційної сировини приділяється мало уваги. Доведено, що продукти переробки такої зернової сировини як сорго, амарант і льон є перспективними інгредієнтами безглютенівих зернових батончиків.

Встановлено, що додавання патоки до рецептурного складу зернових батончиків погіршувало форму, структуру та консистенцію зернових батончиків. Сумісне введення до рецептурного складу батончиків такої зернової основи, як поп-сорго, поп-амарант і лляний шрот, поряд з використанням у якості зв'язуючого компоненту меду, агар-агару та/або яблучного пектину замість патоки дозволяє отримати продукт з високими органолептичними якостями та енергетичною цінністю 318–414 ккал.

Розроблені рецептури безглютенівих зернових батончиків сприяють розширенню асортименту такої продукції на вітчизняному ринку для забезпечення функціональними продуктами харчування населення, зокрема, людей, які не можуть вживати глютенівмісні продукти харчування.

Список літератури

- Кордзя Н. Р., Ковалів І. О. Асортимент батончиків зернових на регіональному ринку. *Товари і ринки*. 2019. № 1. С. 40–51. doi: 10.31617/tr.knute.2019(29)04.
- Palazzolo G. Cereal bars: they're not just for breakfast anymore. *Cereal Foods World*. 2003. № 48 (2). Р. 70–78.
- Мардар М. Р. Маркетингові дослідження товарного асортименту зернових пластівців. *Наукові праці ОНАХТ*. 2014. № 46 (1). С. 260–263.
- Миколенко С., Тимчак Д. Вплив технологічних факторів на поп-властивості зерна сорго. *Харчова промисловість*. 2019. Вип. 26. С. 14–21. doi: 10.24263/2225-2916-2019-26-4.
- Сова Н. А., Луценко М. В., Терещенко Т. В. Дослідження технологічних властивостей обрнушеного насіння промислових конопель. *Аграрна наука та освіта в XXI столітті: проблеми, перспективи та інновації*. № 9. С. 248–253.
- Mykolenko S., Zhygunov D., Rudenko T. Baking properties of different amaranth flours as wheat bread ingredients. *Food science and technology*. 2020. Vol. 14, Iss. 4. P. 62–71. doi: 10.15673/fst.v14i4.1896.
- Миколенко, С. Ю. Дослідження впливу амарантового та льняного борошна на якість печива. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 228–240. doi: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-228-240.
- Protein Bar Market. Segmented by type, source, end product, and geography (2018–2023). *Mordor Intelligence*. 2018. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/protein-bar-market> (дата звернення 11. 12. 2020).
- Кордзя Н. Р., Ковалів І. О. Вивчення компонентного складу батончиків зернових, що реалізуються у торговельних мережах м. Одеса та Одеської області. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. 2019. № 22. С. 74–80.
- Аналіз ринку снєків України. 2019. URL: <https://proconsulting.ua/ua/issledovanie-gynka/obzor-gynka-snekov-ukrainy-2019-god> (дата звернення: 13.08. 2020).
- Резниченко І. Ю., Позняковський І. Ю. Новый вид пищевых концентратов. *Пищевая промышленность*. 2004. № 10. С. 25–32.
- Державний комітет статистики України. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/oper_new.html (дата звернення: 19.10. 2020).
- Тучинська А. І., Наумова М. А. Ринок зернових батончиків в Україні. *Вісник*. 2017. № 9. С. 36–41.
- Сулейменова М. Ш., Рустемова А. Ж., Рубцова А. А. Современные подходы к разработке технологии получения зерновых батончиков. *Научные работы Алматинский технологический университет*. 2015. № 5. С. 71–77.
- Состав и способ производства батончиков «Мюсли»: пат. 2270581 РФ, А23L 1/10, А23G 3/00. №2003101253/13; заявл. 20.12.2004; опубл. 27.02.2006, Бюл. №6.
- Чагайда А., Цирульнікова В., Завадько І. Розроблення способу виробництва батончиків підвищеної енергетичної цінності. *Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки: технології, якість та безпека*. 2017. С. 22–23.
- Важненко Г. І. Амарантова продукція корисна і промислового, і домашнього приготування. *Асоціація амаранту*. 2020. № 35. С. 45–48.
- Стеценко Н. О., Андрейченко Н. О. Розроблення способу виробництва фруктових батончиків для спецконтингентів. *Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки: технології, якість та безпека: зб. матеріалів міжнар. наук.-практ. конф., 12–13 трав. 2016 р.*: НУХТ, 2016. С. 12–14.
- Зерновий батончик «Оздоровчий»: пат. 94898 Україна, А21D 13/02, А23G 3/00, А23L 1/48. № u 2014 04884; заявл. 07.05.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23.
- Зерновий батончик «Оздоровчий»: пат. 109597 Україна, А23L 1/164, А23L 1/29, А21D 13/02, А23G 3/36. № a 2014 04883; заявл. 07.05.2014; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 17.
- Бажай-Жежерун С. А., Смутьська Ю. В., Антонюк М. М. Мікробіологічні показники якості зернового батончика. *Матеріали Міжнародної науково-*

- практичної конференції [«Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки: технології, якість та безпека»], (Київ, 28–29 травня 2015 р.). К.: НУХТ, 2015. С. 54–55.
22. Бажай-Жежерун С. А., Антонюк М. М. Дослідження показників якості батончика на основі біологічно-активованого зерна. *Технології харчової і легкої промисловості*. 2015. № 3 (23). С. 15–17. doi: 10.15587/2312-8372.2015.44006
 23. Бажай-Жежерун С. А. Батончик глазуrowаний на основі пророщеного зерна пшениці. *Наукові праці НУХТ*. 2014. №3. С. 189–196.
 24. Спосіб виробництва енергетичних батончиків: пат. 78251 Україна, A23G 3/00, A23 G 1/48. № u 2012 11083; заявл. 24.09.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.
 25. Батончик висівковий для осіб, що контролюють масу тіла «Спорт Слім»: пат. 106360 Україна, A23G 3/00. № u 2015 10044; заявл. 15.10.2015; опубл. 25.04.2016, Бюл. №8.
 26. Батончик висівковий для осіб, що контролюють масу тіла «Спорт Слім шоколадний»: пат. 94898 України, A23G 3/00. № u 2015 10045; заявл. 15.10.2015; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8.
 27. Bialek M., Rutkowska J., Radomska J. Nutritional value and consumer acceptance of new cereal bars offered to children. *Polish J. of Food and Nutrition Science*. 2016. Vol. 66. № 3. P. 211–219. doi: 10.1515/pjfn-2015-0033.
 28. Agbaje R., Hassan C. Z., Arifin N., Rahman A. A. Sensory preference and mineral contents of cereal bars made from glutinous rice flakes and sunnah foods. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*. 2014. №.8 (12). P. 26–31. doi: 10.9790/2402-081222631.
 29. Santos C. T., Bonomo R. F., da Costa Ilhéu Fontan R., Bonomo P., Veloso C. M., Cardoso Reis Fontan G. Characterization and sensorial evaluation of cereal bars with jackfruit. *Acta Scientiarum Technology*. 2011. Vol. 33 (1). P. 81–85. doi: 10.4025/actascitechnol.v33i1.6425.
 30. Kaur R., Ahluwalia P., Sachdev P. A., Kaur A. Development of gluten-free cereal bar for gluten intolerant population by using quinoa as major ingredient. *J Food Sci Technol*. 2018. № 55(9). P. 3584–3591. doi: 10.1007/s13197-018-3284-x.
 31. Тимчак Д. О., Миколенко С. Ю., Чорней К. А., Бурій Д. О. Дослідження поп-властивостей зерна соризу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2020. № 4(6). С. 138–143. doi: 10.20998/2413-4295.2020.04.20
 32. Гирич С. В., Лояніч Г. С. Сучасні погляди на споживні переваги та проблеми безпеки рослинних олій. *Національна економіка*. 2018. № 5. С. 37–41.
- References (transliterated)**
1. Kordzaia N. R., Kovaliv I. O. Assortment of cereal bars on the regional market. *Tovary i rynky [Goods and markets]*. 2019, no. 1, pp. 40–51, doi:10.31617/tr.knute.2019(29)04.
 2. Palazzolo G. Cereal bars: they're not just for breakfast anymore. *Cereal Foods World*. 2003. № 48 (2), pp. 70–78.
 3. Mardar M. R. Marketing research of the product range of cereals. *Naukovi pratsi ONAKhT [Scientific works of ONAHT]*, 2014, no. 46 (1), pp. 260–263.
 4. Mykolenko S., Tymchak D. Vplyv tekhnolohichnykh faktoriv na pop-vlastyvosti zerna sorho [Influence of technological factors on the pop properties of sorghum grain]. *Kharchova promyslovist [Food Industry]*, 2019, Iss. 26, pp. 14–21, doi: 10.24263/2225-2916-2019-26-4.
 5. Sova N. A., Lutsenko M. V., Tereshchenko T. V. Doslidzhennia tekhnolohichnykh vlastyvostei obrushenoho nasinnia promyslovykh konopel [Research of technological properties of crushed seeds of industrial hemp]. *Ahrarna nauka ta osvita v KhKhI stolitti: problemy, perspektyvy ta innovatsii [Agricultural science and education in the XXI century: problems, prospects and innovations]*, no. 9, pp. 248–253.
 6. Mykolenko S., Zhygunov D., Rudenko T. Baking properties of different amaranth flours as wheat bread ingredients. *Food science and technology*, 2020, Vol. 14, Iss. 4, pp. 62–71, doi: 10.15673/fst.v14i4.1896.
 7. Mykolenko S. Doslidzhennia vplyvu amarantovoho ta lnianoho boroshna na yakist pechuya [Study of the influence of amaranth and flax flour on the quality of cookies]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii [Technical sciences and technologies]*, 2020, no 1 (19), pp. 228–240, doi: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-228-240.
 8. Protein Bar Market. Segmented by type, source, end product, and geography (2018–2023). *Mordor Intelligence*. 2018. Available at: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/protein-bar-market> (accessed: 11. 12. 2020).
 9. Kordzaia N. R., Kovaliv I. O. Vyvchennia komponentnoho skladu batonchykyv zernovykh, shcho realizuiutsia u torhovelykh merezhakh m. Odesa ta Odeskoi oblasti [Study of the component composition of grain bars sold in retail chains in Odessa and Odessa region]. *Visnyk Tekhnichni nauky [Bulletin of Lviv University of Trade and Economics. Technical sciences]*, 2019, no 22, pp. 74–80.
 10. Analiz rynku snekiv ukrainy [Analysis of the snack market of Ukraine] 2019. Available at: <https://proconsulting.ua/ua/issledovanie-rynka/obzor-rynka-snekov-ukrainy-2019-god> (accessed: 13.08. 2020).
 11. Reznichenko I. Yu., Poznyakovskiy I. Yu. Novyy vid pischevyykh konsentratov [A new type of food concentrates]. *Pischevaya promyishlennost [Food industry]*, 2004, no. 10, pp. 25–32.
 12. Derzhavnyi komitet statystyky Ukrainy [State Committee of Statistics of Ukraine]. Available at: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/oper_new.html (accessed: 19.10. 2020).
 13. Tuchynska A. I., Naumova M. A. Rynok zernovykh batonchykyv v Ukraini [Grain bars market in Ukraine]. *Visnyk*, 2017, no. 9, pp. 36–41.
 14. Suleymenova M. Sh., Rustemova A. Zh., Rubtsova A. A. Sovremennyye podhody k razrabotke tekhnologii polucheniya zernovykh batonchikov [Modern approaches to the development of technology for producing grain bars]. *Nauchnyye raboty Almatinskoy tekhnologicheskoy univertsitet*, 2015, no 5, pp. 71–77.
 15. Sostav i sposob proizvodstva batonchikov «Myusli»: pat. 2270581 RF, A23L 1/10, A23G 3/00. no 2003101253/13; zayavl. 20.12.2004; publ. 27.02.2006, Byul. no 6.
 16. Chahaida A., Tsyrunnikova V., Zavadko I. Rozroblennia sposobu vyrobnytstva batonchykyv pidvyshchenoi enerhetychnoi tsinnosti [Development of a method for the production of bars of high energy value]. *Ozдорovchi kharchovi produkty ta diietychni dobavky: tekhnolohii*,

- yakist ta bezpeka*, 2017, pp. 22–23.
17. Vazhnenko H. I. Amarantova produktsiia korisna i promyslovoho, i domashnoho pryhotuvannya [Amaranth products are useful for both industrial and home cooking]. *Asotsiatsiia amarantu*, 2020, no 35, pp. 45–48.
 18. Stetsenko N. O., Andreichenko N. O. Rozroblennia sposobu vyrobnytstva fruktovo-horikhovykh batonchykiv dlia spetskontynhentiv [Development of a method for the production of fruit and nut bars for special contingents]. *Ozdorovchi kharchovi produkty ta diietychni dobavky: tekhnologii, yakist ta bezpeka: zb. materialiv mizhnar. nauk.-prakt. konf., 12-13 trav. 2016: NUKhT*, 2016, pp. 12–14.
 19. Zernovyi batonchik «Ozdorovchyi» [Grain bar “Health”]: pat. 94898 Ukraina, A21D 13/02, A23G 3/00, A23L 1/48. № u 2014 04884; zaiavl. 07.05.2014; publ. 10.12.2014, Biul. no 23.
 20. Zernovyi batonchik «Ozdorovchyi» [Grain bar “Health”]: pat. 109597 Ukraina, A23L 1/164, A23L 1/29, A21D 13/02, A23G 3/36. № a 2014 04883; zaiavl. 07.05.2014; publ. 10.09.2015, Biul. No.17.
 21. Bazhai-Zhezherun S. A., Smulska Yu. V., Antoniuk M. M. Mikrobiolohichni pokaznyky yakosti zernovoho batonchyka [Microbiological indicators of grain bar quality]. *Materialy Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii «Ozdorovchi kharchovi produkty ta diietychni dobavky: tekhnologii, yakist ta bezpeka», (Kyiv, 28 – 29 travnia 2015)*. Kyiv: NUKhT, 2015, pp. 54–55.
 22. Bazhai-Zhezherun S. A., Antoniuk M. M. Doslidzhennia pokaznykiv yakosti batonchyka na osnovi biolohichno-aktyvovanoho zerna [Study of bar quality indicators based on biologically activated grain]. *Tekhnologii kharchovoi i lehkoi promyslovosti*. 2015, no.3 (23), pp. 15–17, doi: 10.15587/2312-8372.2015.44006.
 23. Bazhai-Zhezherun S. A. Batonchik hlazurovani na osnovi proroshchenoho zerna pshenytsi [The bar is glazed on the basis of the germinated grain of wheat]. *Naukovi pratsi NUKhT*, 2014, no.3, pp. 189–196.
 24. Sposib vyrobnytstva enerhetychnykh batonchykiv [A method of producing energy bars]: pat. 78251 Ukraina, A23G 3/00, A23 G 1/48. № u 2012 11083; zaiavl. 24.09.2012; publ. 11.03.2013, Biul. no 5.
 25. Batonchik vysivkovyi dlia osib, shcho kontroliuiut masu tila «Sport Slim» [Bran bar for persons controlling body weight “Sport Slim”]: pat. 106360 Ukraina, A23G 3/00. № u 2015 10044; zaiavl. 15.10.2015; opubl. 25.04.2016, Biul. № 8.
 26. Batonchik vysivkovyi dlia osib, shcho kontroliuiut masu tila «Sport Slim shokoladnyi» [Bran bar for people who control body weight “Sport Slim chocolate”]: pat. 94898 Ukrainy, A23G 3/00. № u 2015 10045; zaiavl. 15.10.2015; opubl. 25.04.2016, Biul. № 8.
 27. Bialek M., Rutkowska J., Radomska J. Nutritional value and consumer acceptance of new cereal bars offered to children. *Polish J. of Food and Nutrition. Science*, 2016, Vol. 66, no. 3, pp. 211–219, doi: 10.1515/pjfn-2015-0033.
 28. Agbaje R., Hassan C. Z., Arifin N., Rahman A. A. Sensory preference and mineral contents of cereal bars made from glutinous rice flakes and sunnah foods. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 2014, no.8 (12), pp. 26–31, doi:10.9790/2402-081222631.
 29. Santos C. T., Bonomo R. F., da Costa Ilhéu Fontan R., Bonomo P., Veloso C. M., Cardoso Reis Fontan G. Characterization and sensorial evaluation of cereal bars with jackfruit. *Acta Scientiarum Technology*, 2011, Vol. 33 (1), pp. 81–85, doi: 10.4025/actascitechnol.v33i1.6425.
 30. Kaur R., Ahluwalia P., Sachdev P. A., Kaur A. Development of gluten-free cereal bar for gluten intolerant population by using quinoa as major ingredient. *J Food Sci Technol*, 2018, no. 55 (9), pp. 3584–3591, doi: 10.1007/s13197-018-3284-x.
 31. Tymchak D. O., Mykolenko S. Yu., Chornei K. A., Buri D. O. Study of the pop properties of rice grain. *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: New solutions in modern technology*, 2020, no. 4(6), pp. 138–143, doi: 10.20998/2413-4295.2020.04.20.
 32. Hyrych S. V., Loianich H. S. Suchasni pohliady na spozhyvni perevahy ta problemy bezpeky roslynnykh olii [Modern views on consumer benefits and safety issues of vegetable oils]. *Natsionalna ekonomika [National economy]*. 2018, no. 5, pp. 37–41.

Відомості про авторів (About authors)

Чорней Крістіна Анатоліївна – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, асистент кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції; м. Дніпро, Україна; ORCID: 0000-0003-0800-6071; e-mail: summer90821@gmail.com.

Kristina Chornei – Dnipro State Agrarian and Economic University, assistant of Department of Agricultural Products Storage and Processing Technologies, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0800-6071; e-mail: summer90821@gmail.com.

Тимчак Дмитро Олександрович – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, викладач кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції; м. Дніпро, Україна; ORCID: 0000-0003-1216-6078; e-mail: dmyrotymchak@gmail.com.

Dmytro Tymchak – Dnipro State Agrarian and Economic University, Lecturer of Department of Agricultural Products Storage and Processing Technologies, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1216-6078; e-mail: dmyrotymchak@gmail.com.

Миколенко Світлана Юріївна – кандидат технічних наук, доцент, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, доцент кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції; м. Дніпро, Україна; ORCID: 0000-0002-1959-1141; e-mail: svetlana.mykolenko@gmail.com.

Svitlana Mykolenko – Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor, Dnipro State Agrarian and Economic University, Associate Professor of Department of Agricultural Products Storage and Processing Technologies, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1959-1141; e-mail: svetlana.mykolenko@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Чорней К. А., Тимчак Д. О., Миколенко С. Ю. Перспективи вдосконалення рецептурного складу зернових батончиків та аналіз ринку. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 127-135. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.18.

Please cite this article as:

Chornei K., Tymchak D., Mykolenko S. Prospects for improving the recipe composition of grain bars and market analysis. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 127-135, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.18.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Чорней К. А., Тимчак Д. А., Мыколенко С. Ю. Перспективы усовершенствования рецептурного состава зерновых батончиков и анализ рынка. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 127-135. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.18.

АННОТАЦИЯ Рынок безглютеновых зерновых батончиков как пищевых концентратов и перспективных пищевых продуктов исследовался благодаря своим диетическим свойствам и функциональному назначению. Ассортимент зерновых батончиков составил 12% от общего количества пищевых концентратов в Украине, и только около 1% из которых отводится зерновым батончикам на основе безглютеновой сырья. Основным компонентом как отечественных, так и зарубежных батончиков есть разные продукты переработки зерна. Ассортимент зерновых батончиков отечественного и зарубежного производства проанализирован с точки зрения их компонентного состава и позиционированием на рынке, классифицированы на четыре группы: батончики, обогащенные витаминами; батончики с добавлением ароматизаторов и консервантов; батончики с заменителями сахара, популярные среди отечественных производителей; батончики с добавлением пальмового масла, характерные для экспортной продукции. Зерновые батончики отечественных производителей характеризовались добавлением льна, чиа, амаранта, тыквы, конопли и продуктов их переработки в составе безглютеновых батончиков, но в небольших количествах. Добавление сухофруктов и ягод, таких как вишня, клюква, абрикосы и виноград, также являются популярными среди отечественных производителей. Подавляющее большинство отечественных производителей использовали смесь из четырех видов злаковых хлопьев, как зерновой основы, а именно: овсяные, пшеничные, ячменные и кукурузные хлопья. Учитывая потребность в альтернативных ресурсах зерновых для оздоровительных батончиков, сорго, амаранта, льна и продуктов их переработки, выступают отличным сырьем для разработки безглютеновой продукции. Влияние нетрадиционного сырья (поп-сорго, поп-амарант, льняной шрот, жмых грецкого ореха и т.д.) на качество зерновых батончиков. Использование данных ингредиентов способствовало обогащению зерновых батончиков основными макро- и микроэлементами, лизином, полифенолами, лигнином и витаминами. Разработанные безглютеновые зерновые батончики показали высокие потребительские качества, поэтому способны отвечать растущему спросу на безглютеновые продукты питания среди потребителей, обеспечивая расширение ассортимента зерновых батончиков на украинском рынке.

Ключевые слова: зерновой батончик; поп-сорго; поп-амарант; льняной шрот; качество; ассортимент

Надійшла (received) 22.04.2021

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

<i>Аскеров М. Г.</i> Нові матеріали для виробництва змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки	3
<i>Бурдейна В. М., Грінченко Г. С., Артюх С. М., Трищ А. Р.</i> Оцінювання точності координованих отворів малого діаметру, виготовлених з направленням різального інструменту	9
<i>Гончаров Є. В., Крюкова Н. В., Вітвицька С. О., Марков В. С., Поляков І. В.</i> Розвиток, конструювання та використання безпілотних літальних апаратів для ліній електропередач	15
<i>Лежнюк П. Д., Кравчук С. В., Малогулко Ю. В., Прокопенко І. О.</i> Математичне моделювання роботи системи накопичення енергії на ринку допоміжних послуг об'єднаної електроенергетичної системи України	21
<i>Ольховський І. П., Фурсов А. М.</i> Квазіоптичний твердотільний генератор з відкритою квазіодночастотною сферошелетною коливальною системою	30
<i>Стисло Б. О., Зайцев Р. В., Мінакова К. О., Кіриченко М. В., Ересько О. В.</i> Аналіз ефективності схем активного балансування акумуляторних батарей	38
<i>Тарасова В. О.</i> Факторний аналіз теплової схеми ТЕЦ з суперкритичним паровим циклом на основі ексергетичного методу	46

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

<i>Вавіленкова А. І.</i> Роль тестування програмного продукту для командної розробки	56
<i>Кондратьєв С. Б., Костенко В. Л., Ядрова М. В.</i> Метод контурів для позиціонування об'єктів в мобільних системах комп'ютерного зору	62
<i>Кришталь В. М., Снитюк В. Є., Федоренко Д. С.</i> Критерій актуальності обладнання при розв'язанні задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки в умовах невизначеності	70
<i>Крячок О. С., Реуцький М. О., Сушко Д. А.</i> До питання розрахунку характеристик спеціальних пристроїв з магнітною системою на основі постійних магнітів	77
<i>Цибульник С. О., Бідник Д. С.</i> Проектування архітектури автоматизованої бібліографічної системи	83

ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ

<i>Брагіна Л. Л., Яйцький С. Н., Петров Д. В., Старолат О. Є.</i> Інтеграція технологій у виробництві архітектурно-будівельного скла	90
<i>Витязанець В. С., Шапоров В. П., Пітак І. В., Баранова А. О.</i> Конструктивне оформлення та особливості процесів у випалювальних шахтних печах з використанням газоподібного палива	96
<i>Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Єрмоленко І. Ю., Індіков С. М., Горохівська Н. В., Сарай В. В.</i> Функціональні електрохімічні покриття у технологіях подвійного призначення	101
<i>Мельник Ю. Р., Мельник С. Р., Магорівська Г. Я., Реутський В. В.</i> Вплив властивостей оксидів металів на трансестерифікацію тригліцеридів олій етанолом та бутан-1-олом	113
<i>Самойленко Н. М., Катенін В. Д., Баранова А. О.</i> Переробка та утилізація фотоелектричних сонячних панелей	121
<i>Чорней К. А., Тимчак Д. О., Миколенко С. Ю.</i> Перспективи вдосконалення рецептурного складу зернових батончиків та аналіз ринку	127

CONTENTS

ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

<i>Askerov M.</i> New materials for the production of replaceable parts of tillage agricultural machinery	3
<i>Burdeina V., Hrinchenko H., Artiukh S., Trishch A.</i> Estimation of accuracy of coordinated small diameter holes with cutting tool direction	9
<i>Honcharov Ye., Kryukova N., Vietvytska S., Markov V., Polyakov I.</i> Development, design and application of unmanned aerial vehicles for power lines	15
<i>Lezhniuk P., Kravchuk S., Malogulko Y., Prokopenko I.</i> Mathematical modeling of battery energy storage systems in the additional service market of the united electric power system of Ukraine	21
<i>Olkhovskiy I., Fursov A.</i> Quasioptical solid-state generator with open quasi-frequency sphereoseletal oscillating system	30
<i>Styslo B., Zaitsev R., Minakova K., Kirichenko M., Eresko O.</i> Analysis of batteries active balance schemes efficiency	38
<i>Tarasova V.</i> Factor analysis of the thermal scheme of CHP with super critical steam cycle on the basis of exergy method	46

INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

- Vavilenkova A.* The role of software testing for team development 56
- Kondratyev S., Kostenko V., Yadrova M.* Contour method for positioning objects in mobile computer vision systems 62
- Kryshchal V., Snytyuk V., Fedorenko D.* Criteria of actuality of equipment in solving of the problem of completing of emergency and rescue equipment in the conditions of uncertainty 70
- Kriachok O., Reutskyi M., Sushko D.* To the question of the calculating of the special devices characteristics with a magnetic system based on the permanent magnets 77
- Tsybulnyk S., Bidnyk D.* Design of the architecture of an automated bibliographic system 83

CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY

- Bragina L., Yaitsky S., Petrov D., Starolat O.* Investigation of performance characteristics of furnaces for the production of optical and special float glasses 90
- Vytiaganets V., Shaporev V., Pitak I., Baranova A.* Constructive design and features of the processes in the roasting shaft furnaces by using gaseous fuel 96
- Karakurkchi H., Sakhnenko M., Yermolenko I., Indykov S., Horokhivska N., Sarai V.* Functional electrochemical coatings in dual-use technologies 101
- Melnyk Yu., Melnyk S., Mahorivska H., Reutsky V.* Effect of physicochemical properties of d-metal oxides on sunflower oil transesterification 113
- Samoilenko N., Katenin V., Baranova A.* Processing and recycling of photovoltaic solar panels 121
- Chornei K., Tymchak D., Mykolenko S.* Prospects for improving the recipe composition of grain bars and market analysis 127

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ".
СЕРІЯ: НОВІ РІШЕННЯ В СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

Збірник наукових праць

№ 2(8)' 2021

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.nsmi@gmail.com

Підп. до друку «01» червня 2021 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 17,0. Облік.вид.арк. 8,75.
Тираж 50 прим. Зам. № 75. 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
