

p-ISSN 2079-5459
e-ISSN 2413-4295

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



ВІСНИК

Національного технічного університету "ХПІ".
Серія: Нові рішення в сучасних
технологіях

Випуск
4(10)'2021

Харків

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

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

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

№ 4(10)' 2021

No. 4(10)' 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. — № 4(10). — 109 с. — ISSN 2079-5459.

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

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

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

Мова статей – українська, англійська.

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

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

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях» включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща), бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Засновник

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Редакційна колегія

Відповідальний редактор:

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

Члени редколегії:

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

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

Березка Т. О., НТУ «ХПІ», Україна

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

Бурлака М. В., SoftInWay Inc., США

Глушко А. В., НТУ «ХПІ», Україна

Гораш Є., проф., Університет Стратклайда, Великобританія

Гринченко Н. Г., доц., ХДУХТ, Україна

Данильченко Д. О., НТУ «ХПІ», Україна

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

Єнікєєв О. Ф., доц., ДДМА, Україна

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

Колодяжна Л. В., ІПМаш НАНУ, Україна

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

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

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

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

Мазасва В. С., УкрНДІОЖ НАНУ, Україна

Меньшикова С. І., НТУ «ХПІ», Україна

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

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

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

Носенко Т. Т., проф., НУХТ, Україна

Папченко В. Ю., УкрНДІОЖ НАНУ, Україна

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

Пітак І. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial staff

Associate editor:

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

Editorial staff members:

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

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

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

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

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

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

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

Grynchenko N. G., docent, HDUHT, Ukraine

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

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

Yenikieiev O. F., docent, DSEA, Ukraine

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

Kolodyazhnaya L. V., IPMash NASU, Ukraine

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

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

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

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

Mazaeva V. S., UkrRIOF NASU, Ukraine

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

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

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

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

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

Papchenko V. Yu., UkrRIOF NASU, Ukraine

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Shidakova-Kamenyuka E. G., HDUHT, Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 12 від 29 грудня 2021 р.

УДК 621.432.3

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.01

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СПОСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ МЕТОДАМИ НЕРОЗБІРНОГО КОНТРОЛЮ

С. Ю. БІЛІК, Е. В. БОЖКО

Кафедра двигунів внутрішнього згоряння, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Харків, УКРАЇНА
e-mail: serhii.bilyk@khpri.edu.ua

АНОТАЦІЯ Розглянуто питання взаємодії схем діагностування двигунів методами нерозбірного контролю, виконано аналіз існуючих методів, та запропоновано використання комплексних підходів, що підвищують надійність роботи двигунів. Проаналізовано методи нерозбірного діагностування з моделюванням розрегулювання систем двигуна під час експлуатації та діагностування початкових етапів несправностей конструктивного та функціонального характеру. Проведений аналіз дозволив визначити прямі діагностичні параметри, які однозначно характеризують стан об'єкта та непрямі, що пов'язані з прямими функціональними залежностями, та виділити найбільш ефективні, з точки зору визначення кореляційних залежностей - прямі методи діагностування, серед яких можна виділити, наприклад, індичіювання робочого процесу у циліндрі двигуна. Запропонована відносно проста схема організації вимірювання та визначення сигналів з декількох елементів діагностування одночасно, звідси можна зробити висновок, що інформація з одного каналу вимірювання здатна комплексно охарактеризувати технічний стан декількох елементів механізмів або систем двигуна: вібраційний метод, акустичний метод, методи газової хроматографії, непряме індичіювання за допомогою визначення напруження у шпильках кришки циліндрів, оцінка рівня зносу деталей за вмістом металу у моторному маслі, а також діагностування параметрів за нерівномірністю частоти обертання колінчастого валу. Аналіз методів та способів діагностування двигунів внутрішнього згоряння дозволив дійти висновку, що метод діагностування за нерівномірністю частоти обертання колінчастого валу двигуна являє собою перспективний напрям в розвитку методів нерозбірного діагностування двигунів внутрішнього згоряння, використання якого дозволить виконувати оцінку технічного стану двигуна, виявляти і локалізувати несправності, прогнозувати залишковий ресурс та виконувати моніторинг технічного стану двигуна.

Ключові слова: двигуни внутрішнього згоряння; методи нерозбірного контролю; діагностика двигунів; газова хроматографія; оцінка технічного стану двигуна

ANALYSIS OF METHODS AND METHODS OF DIAGNOSING INTERNAL COMBUSTION ENGINES BY NON-ASSEMBLY CONTROL METHODS

S. BILYK, E. BOZHKO

Department of internal combustion engines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The question of interaction of schemes of diagnostics of engines by methods of non-disassembled control is considered, the analysis of existing methods is executed, and the use of the complex approaches increasing reliability of work of engines is offered. Methods of non-detachable diagnostics with modeling of deregulation of engine systems during operation and diagnosing the initial stages of structural and functional malfunctions are analyzed. The analysis allowed to determine the direct diagnostic parameters that unambiguously characterize the state of the object and indirect, associated with direct functional dependencies, and identify the most effective, in terms of determining correlations - direct diagnostic methods, which include, for example, indication of the working process in the engine cylinder. A relatively simple scheme of measuring and determining signals from several diagnostic elements simultaneously is proposed, from which we can conclude that information from one measurement channel can comprehensively characterize the technical condition of several elements of engine mechanisms or systems: vibration method, acoustic method, gas chromatography methods, indirect indication by determining the stress in the studs of the cylinder head, assessing the level of wear of parts on the metal content in the engine oil, as well as diagnosing the parameters of the uneven speed of the crankshaft. Analysis of methods and techniques for diagnosing internal combustion engines led to the conclusion that the method of diagnosing the uneven speed of the engine crankshaft is a promising direction in the development of methods of non-detachable diagnostics of internal combustion engines. residual life and monitor the technical condition of the engine.

Keywords: internal combustion engines; non-detachable control methods; engine diagnostics; gas chromatography; assessment of technical condition of the engine

Вступ

Вважається, що одним з важливих напрямів забезпечення і підтримки технічної (параметричної) надійності двигунів є поступовий перехід від планово-попереджувальної системи ремонту до системи технічного обслуговування за фактичним технічним станом. В цьому випадку система діагностування за фактичним станом передбачає виконання технічного обслуговування, або ремонтів двигуна по мірі необхідності, а не через регламентовані терміни, які інколи не відповідають реальній потребі у ремонті, що призводять або до непотрібної передчасної переборки механізмів, або до ремонтних робіт, які можна було б

попередити у випадку діагностування несправностей ще до появи аварійно небезпечного пошкодження.

Мета роботи

Визначити діагностичні параметри, які безпосередньо характеризують стан об'єкта та пов'язані функціональними залежностями з прямими, та виділити найбільш ефективні, з точки зору визначення кореляційних залежностей, запропонувати відносно просту схему організації вимірювання та одностороннього сигналу діагностування одночасно з декількох елементів, яка здатна комплексно охарактеризувати технічний стан декількох елементів або систем двигуна.

Виклад основного матеріалу

За даними Фленсбурського дослідного інституту, 56 % дизелів МАН, що були розібрані за запланованими строками технічного обслуговування були передчасними [1]. Крім того, кожне перебирання та складання механізмів викликає штучний процес припрацювання, під час якого підвищується швидкість зносу деталей і, як наслідок, зменшується загальний ресурс двигуна.

Перехід до експлуатації двигунів за фактичним технічним станом можливий у випадку створення ефективних автоматизованих систем нерозбірного діагностування технічного стану, що призначені для оцінки стану об'єкта, пошуку несправностей і визначення причин їх виникнення, прогнозування залишкового ресурсу і визначення термінів поточного ремонту без зайвого перебирання двигуна. Визначення технічного стану механізмів та систем двигуна без його розбирання дозволить значно зменшити витрати на його ремонт, тому що вартість ремонту складає приблизно 50 % витрат на розбирання та складання.

Відомо, що будь-яке розбирання двигуна негативно впливає на його подальшу працездатність. З якою б ретельністю не було виконано розбирання та збирання, режим затягування з'єднань завжди відрізняється від початкового. Внаслідок відмінностей у деформаціях матеріалів деталей при вторинному збиранні змінюється їхня геометрична форма, порушується співвісність і т.д. Це призводить до того, що при подальшому функціонуванні двигуна знов відбувається припрацювання деталей, яке, як відомо, супроводжується підвищеною швидкістю зносу деталей. На вторинне припрацювання витрачається до 30 % ресурсу роботи вузлів, агрегатів, систем, що зменшує їхню експлуатаційну довговічність [2].

Двигун внутрішнього згоряння є складною термодинамічною, гідравлічною, електронною та механічною системою, що виконує функцію силової установки більшості транспортних засобів і від його технічного стану багато в чому залежить своєчасне виконання робітничих робіт, плану перевезень, та безпека руху. Тому особливу увагу необхідно приділяти двигуну, як одному з головних об'єктів діагностування на транспортному засобі, а саме, вибору комплексу датчиків, за допомогою яких виконується діагностика двигуна без його розбирання.

Метою нерозбірного діагностування є визначення розрегулювання систем та механізмів двигуна у процесі експлуатації та діагностування початкових ознак несправностей конструктивного або функціонального характеру.

Сучасні методи нерозбірного діагностування можна поділити на дві групи [3]:

Функціональний, що передбачає контроль механізмів та систем двигуна без виведення його з експлуатації. В якості контрольних режимів призначають експлуатаційні режими роботи механізмів та систем двигуна.

Тестовий - передбачає виведення діагностування двигуна з експлуатації та контроль параметрів при подачі на двигун та його механізми спеціальних зовнішніх сигналів, або прикладають додаткові зусилля, та спостерігають за реакцією.

У процесі експлуатації двигунів на певних режимах роботи вимірюють заздалегідь визначений набір найбільш інформативних параметрів. Функціональні методи діагностування передбачають індивідуальну оцінку стану конкретного двигуна від створення і до кінця експлуатації. При цьому проводять необхідні виміри через певні, обґрунтовано вибрані проміжки часу. Всі вимірювання параметрів повинні відбуватися за одних і тих же умов роботи, та оцінений вплив стану оточуючого середовища. Як правило, це фіксовані параметри, ефективна потужність і частота обертання колінчастого валу.

Для систем, що реалізують методи функціонального діагностування розглядаються два варіанти виконання:

- збір інформації на транспортній установці з подальшою обробкою на ПЕОМ, та передача її на пункт управління;

- збір та обробка інформації безпосередньо на транспортному засобі (бортова система керування). Така система здатна визначати невідкладні несправності та інформувати про необхідність виконання ремонту.

В двигунобудуванні діагностичні параметри поділяють на прямі, які однозначно характеризують стан об'єкта та непрямі, що зв'язані з прямими функціональними залежностями. В цьому випадку кажуть про прямі та непрямі методи діагностування.

З точки зору визначення кореляційних залежностей, найбільш ефективними є прямі методи діагностування, серед яких можна виділити, наприклад, індиціювання робочого процесу у циліндрі двигуна. Відомо, що використання більшості з прямих методів, як правило, потребує повного або часткового розбирання двигуна або його механізмів для проведення необхідних вимірювань. Непрямі методи виявляються більш складними для побудови кореляційних зв'язків у порівнянні з прямими.

Прикладами непрямих методів діагностування можуть слугувати вібраційний, акустичний, методи газової хроматографії, непряме індиціювання за допомогою визначення напруження у шпильках кришки циліндрів, оцінка рівня зносу деталей за вмістом металу у моторному маслі, а також діагностування параметрів за нерівномірністю частоти обертання колінчастого валу. До переваг непрямих методів діагностування відноситься простота організації вимірювання та охоплення сигналів з декількох елементів діагностування одночасно, звідси можна зробити висновок, що інформація з одного каналу вимірювання здатна комплексно охарактеризувати технічний стан декількох елементів механізмів або систем двигуна.

Діагностування реалізують за загальним принципом «від цілого до часткового». Це означає, що перш ніж робити поелементну, або поглиблену діагностику двигуна, необхідно визначити загальний технічний стан його механізмів та систем за вихідними показниками (N_e , M_e , g_e , n , токсичність відпрацьованих газів та їхня димність, рівні шумів та ін.).

Діагностика двигуна індиціюванням та вимірюванням вібрації в наслідок нерівномірності обертання колінчастого валу.

При порівнянні індичіювання та вимірювання нерівномірності обертання колінчастого валу двигуна очевидно, що останній метод має суттєві переваги за інформативністю. Індичіювання двигуна характеризує якість робочого процесу в окремо розглянутому циліндрі, а вимірювання нерівномірності колінчастого валу являє собою комплексний показник, який характеризує роботу всіх механізмів та систем, що забезпечують виконання робочого процесу у всіх циліндрах двигуна.

Аналіз схем силових зв'язків у кривошипно-шатунному механізмі двигуна показав наявність впливу якості робочого процесу на відхилення у роботі колінчастого валу, тобто кореляційну залежність з індикаторним тиском P_i . Індикаторний тиск, що діє на поверхню поршня - передає більшу його частину через поршневі палець до шатуна. Останній передає зусилля на шатунну шийку колінчастого валу, де і виконується завершення перетворення поступового руху поршня у обертальне колінчастого валу [2].

Таким чином, характер зміни індикаторного тиску можна прослідити у характері зміни обертового моменту колінчастого валу.

Обертовий момент фізично пов'язаний з його кутовою швидкістю (рис. 1) та його прискоренням.

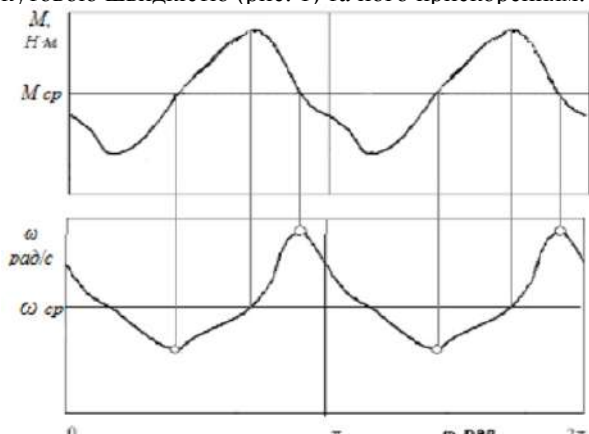


Рис. 1 – Залежність обертового моменту і кутової швидкості колінчастого валу за кутом обертання у випадку рівномірної роботи циліндрів

Ми бачимо, що фізичний зв'язок нерівномірності кутової швидкості дозволяє оцінити вплив можливих несправностей на індикаторний тиск через форму, що представлена на графіку нерівномірності кутової швидкості обертання колінчастого валу. На форму індикаторної діаграми можуть впливати несправності паливної апаратури, циліндро-поршнєвої групи, газорозподільного механізму, системи наддуву та випуску відпрацьованих газів. За один з суттєвих факторів, що визначає зміну індикаторного тиску в циліндрі, виділяють погіршення герметичності камери згоряння, яке викликає зниження тиску стискання і, як наслідок, температури наприкінці процесу стискання. Що виникає внаслідок погіршення розпилювання палива і зниження тиску спалаху.

На рис. 2 наведено графічне уточнення впливу зносу верхнього компресійного кільця на форму графіка індикаторного тиску [4].

Можна зробити висновок, що найбільший вплив на індикаторний тиск надають несправності паливної апаратури, тому що саме паливна апаратура забезпечує своєчасність, кількість і якість подачі палива у камеру згоряння.

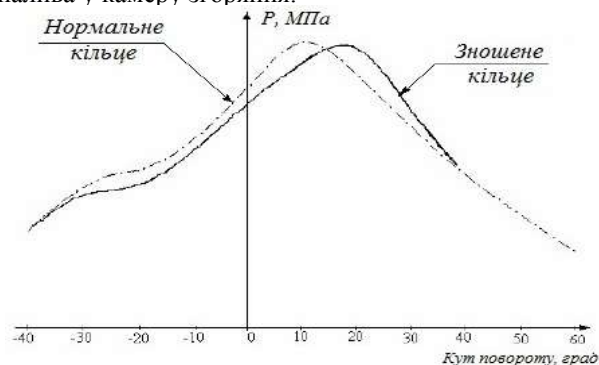


Рис. 2 – Уточнення впливу зносу верхнього компресійного кільця на форму графіка індикаторного тиску

Якщо спрогнозувати можливі несправності форсунок, наприклад закоксування розпилюючих отворів, то можна виявити зниження циклової подачі палива і, як наслідок, зменшення середнього індикаторного тиску. Треба акцентувати увагу, що прогнозується несправна робота форсунки окремого циліндру, а не двигуна в цілому. Зіставлення індикаторних діаграм при нормальній роботі форсунок та при зменшенні циклової подачі, пов'язаній з закоксуванням розпилюючих отворів наведено на рис.3.

На підставі наведених на рис. 3 індикаторних діаграм виконано моделювання графічних залежностей частоти обертання колінчастого валу (рис. 4), на яких спостерігається відповідне збільшення нерівномірності при несправності форсунки [1].

Оскільки, нерівномірність обертання колінчастого валу двигуна викликає значні його вібрації для діагностування технічного стану двигуна пропонується датчик вібрації[5], що зображено на рис.5.

Запропонований датчик вібрації забезпечить підвищення чутливості та надійності роботи датчика в умовах можливих радіальних коливань основних постійних циліндричних магнітів.

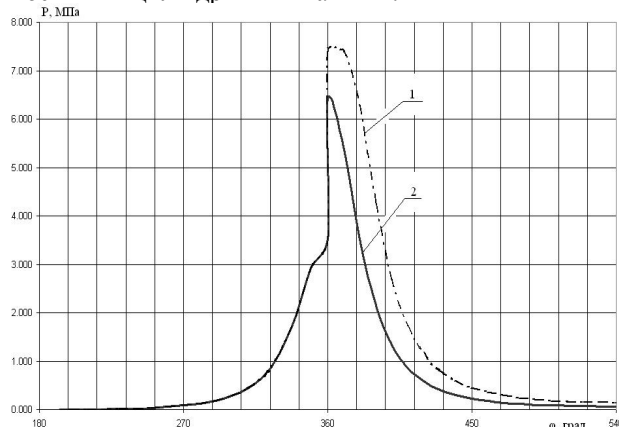


Рис. 3 – Зіставлення індикаторних діаграм при нормальній роботі форсунки (1) та при зменшенні циклової подачі, пов'язаній з закоксуванням розпилюючих отворів (2)

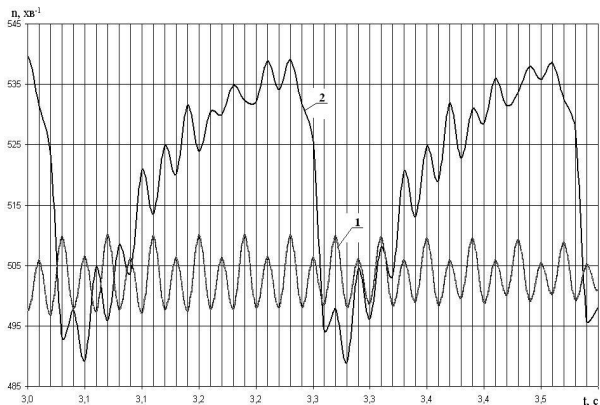


Рис. 4 – Залежність частоти обертання колінчастого валу моделі двигуна від часу на режимі холостого ходу при нормальній роботі форсунки (1) та при її несправності (2)

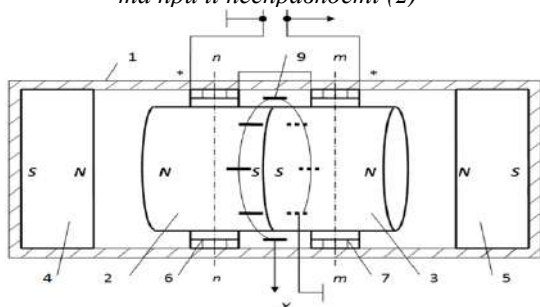


Рис. 5 – Конструкція датчика вібрації

З урахуванням комплексного підходу взаємодії схем діагностування двигунів методами нерозбірного контролю пропонується спосіб застосування газохроматографічного поділу неорганічних і органічних компонентів відпрацьованих газів, що можливо реалізувати з використанням багатоколоночної системи, що складається з однієї капілярної (PLOT / SiO₂) і трьох наповнених газо-адсорбційних колонок (БАУ, полісорб-1, цеоліт Саа), а також метанатора і блоку-реактора з міддю. Що дозволяє без попереднього концентрування проводити прямий аналіз ОГ з одночасним визначенням неорганічних (CO, CO₂, NO_x, H₂S) і органічних (w-алканів і аренів до C_n) компонентів в діапазонах роботи двигунів внутрішнього згоряння [6].

Деякі кутові швидкості обертання колінчастого валу надає змогу непрямим методом діагностування відслідкувати якість роботи кожного окремого циліндра без вимірювання його індикаторного тиску, а головне, визначити стан кривошипно-шатунного механізму двигуна без його розбирання.

У сучасних умовах покоління ЕОМ дозволяє створювати бортові системи синтезу та аналізу, а також портативні системи експрес-діагностики, основою для яких може слугувати нерозбірний метод діагностування за нерівномірністю обертання колінчастого валу.

Для отримання показників нерівномірності обертання колінчастого валу двигуна, сигналів датчиків, необхідно з високим ступенем дискретизації у часі зняти показники його «провороту» на незначний кут. У більшості конструкцій дані «провороту» колінчастого валу визначаються, за допомогою диференціального датчика Холла, що під'єднується до колінчастого валу двигуна. Датчик встановлюється на

торцевій частині колінчастого валу двигуна Д50 з боку привода масляного насоса або генератора. На рис. 6 зображено схему встановлення датчика [1,2].



Рис. 6 – Структура пристрою реєстрування сигналів колінчастого валу двигуна

У даному випадку прилад зчитує дані про різницю часу проходження впадини між зубцями шестірні датчика з достатньо високою точністю (мілісекунди), але не дозволяє встановити, якій фазі роботи двигуна відповідає певний часовий показник. Пристрій записував 625 часових проміжків за один оборот колінчастого валу двигуна. Цього достатньо для дизельного двигуна, що має шість циліндрів (фіксувався час проходження кута 0,576 градусів). Д50 - чотиритактний двигун, інакше кажучи прохід повного робочого циклу відбувався за два оберти колінчастого валу та записувався пакет з 1250 часових показників. Для представлення пакетів експериментальних даних та опису станів двигуна вони записувалися до comma separated values файлів, назва яких відповідала порядковим номерам робочих циклів експериментів.

Змодельовані стани роботи двигуна Д50 і їх кодування наведено у табл. 1.

Таблиця 1 - Змодельовані стани двигуна і їх кодування

Стан двигуна	Код стану
несправність у першому циліндрі через відсутність згоряння	cylinder_1st_off_is 0
несправність у першому циліндрі через відкриття клапана	cylinder_1st_off_is 1
несправність у другому циліндрі через відсутність згоряння	cylinder_2nd_off_is 0
несправність у другому циліндрі через відкриття клапана	cylinder_2nd_off_is 1
несправність у третьому циліндрі через відсутність згоряння	cylinder_3rd_off_is 0
несправність у четвертому циліндрі через відсутність згоряння	cylinder_4th_off_is 0
несправність у четвертому циліндрі через відкриття клапана	cylinder_4th_off_is 1
несправність у п'ятому циліндрі через відсутність згоряння	cylinder_5th_off_is 0
несправність у шостому циліндрі через відсутність згоряння	cylinder_6th_off_is 0
несправність у шостому циліндрі через відкриття клапана	cylinder_6th_off_is 1
робочий стан	good 300kWt
робочий стан на потужності 300 кВт	good

В даній роботі для генерування вихідних даних було необхідно визначити показники станів і математичні моделі для їх відображення в алгоритмі програми. Узагальнюючі функції на всіх вибірках експериментальних даних були побудовані з використанням моделей машинного навчання [7,8].

Статистичні відмінності часових показників у сигналах різних станів роботи двигуна Д50, що приведено на рис. 7, мають суттєво різні розподіли.

Вигляд сигналів для різних станів системи електронного керування наведено у графічній формі на рис.8.

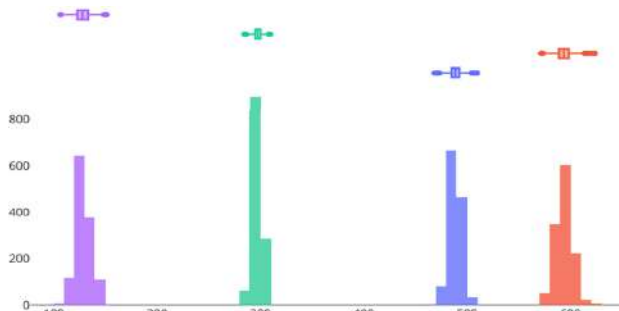


Рис. 7 – Статистичні відмінності часових показників у сигналах різних станів роботи двигуна Д50

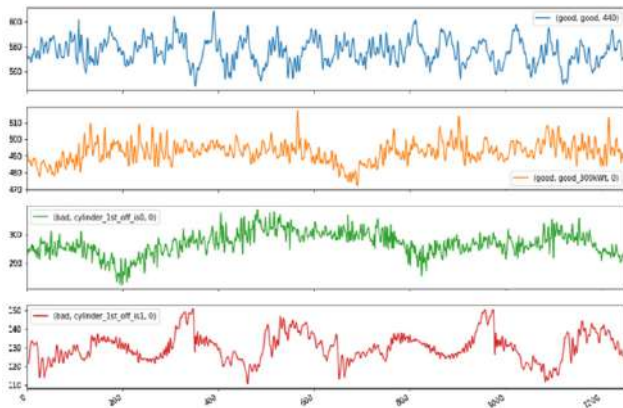


Рис. 8 – Сигнали різних станів системи електронного керування двигуна

Обговорення результатів

В ході проведеного аналізу можна дійти висновку, що перспективними напрямками в подальших дослідженнях та розробках щодо використання характеристик нерівномірності кутової швидкості обертів колінчастого валу (інших елементів конструкцій транспортних засобів) для завдань діагностування, аналізу та прогнозування станів вузлів двигунів є - використання інших категорій експертної вхідної інформації, дослідження додаткових технічних систем, розробка інтелектуальних систем аналізу накопичуваної інформації та планування моніторингу транспортних засобів.

Станом на теперішній час було зроблено достатню кількість спроб використовувати нерівномірність кутової швидкості колінчастого валу, у якості керуючого сигналу методами нерозбірного контролю для оцінки технічного стану двигуна, але єдиного підходу в технічних та теоретичних рішеннях не спостерігається [9,10].

Метод діагностування за нерівномірністю частоти обертання колінчастого валу двигуна являє собою перспективний напрям в розвитку методів нерозбірного діагностування двигунів внутрішнього згоряння, використання якого дозволить виконувати оцінку технічного стану двигуна, виявляти і локалізувати несправності, прогнозувати залишковий ресурс та виконувати моніторинг технічного стану двигуна. Огляд наукових робіт з діагностування двигунів внутрішнього згоряння показав необхідність створення більш досконалих математичних моделей, вдосконалення розроблених методик та використання

систем штучного інтелекту для підвищення достовірності діагнозів [11].

Висновки

Аналіз методів та способів діагностування двигунів внутрішнього згоряння методами нерозбірного контролю дозволив дійти висновку, щодо використання комплексного підходу під час створення схем діагностування двигунів методами нерозбірного контролю, що дозволяє, враховуючи вимоги щодо підвищення техніко-економічних показників, підвищення вимог щодо екологічних показників, забезпечити підвищення ресурсу, та отримати економічний ефект у споживача.

Список літератури

1. Боднар Б. Є., Очкасов О. Б., Децюра О. Я., Черняев Д. В. (ДІП) Методи нерозбірного діагностування дизелів при експлуатації рухомого складу. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Вип. 41. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2012. – 321 с.
2. Задворнов Я. М., Рязанцев В. В. Особливості віброакустичного діагностування технічного стану спряжень деталей дизельних двигунів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2016. 4. Р.175-185.
3. Кончаков Е. И. *Техническая диагностика судовых энергетических установок*. - Владивосток: ДВГТУ, 2007. - 112 с.
4. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників у 6 томах. Т.2. Доводка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. За редакцією проф. А.П. Марченка, проф. А.Ф. Шеховцова – Харків: Видавн. центр НТУ "ХПІ", 2004.
5. Патент на корисну модель 2015 р. Номер патенту: 103326 Дата подання заявки: 18.06.2015 Дата, з якої є чинними права: 10.12.2015 МПК: G01H 11/02 (2006.01), G01H 11/06 (2006.01) бюл. № 23/2015.
6. Разработка способа определения состава отработавших газов двигателей внутреннего сгорания и исследование капиллярных колонок с диоксидом кремния для разделения смесей углеводородов. Смирнов Петр Владимирович. Специальность 05.11.11 - Хроматография и хроматографические приборы. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук Москва. – 2008.
7. Ved M. *Feature Selection and Feature Extraction in Machine Learning: An Overview*. 2018. 19. 7. URL: <https://medium.com/@mehulved1503/featureselection-and-feature-extraction-in-machine-learning-an-overview-57891c595e96>.
8. Васильев Е. А., Прокопенко А. С. Методика діагностування поршневих двигунів внутрішнього згоряння за результатами їх непрямого відображення. *Збірник наукових праць студентів електромеханічного факультету*. – Полтава: ПолтНТУ, 2015. Вип. 6. С. 184-192.
9. Наконечний А. Й., Гетьман О. Л. Методи та засоби діагностування роботи двигуна автомобіля за оцінкою його віброакустичних характеристик. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. Серія: *Автоматика, вимірювання та керування*. 2018. 907. 38-43.
10. Шкрегаль О. М., Лимаренко В. О., Рильський Д. О. Застосування сучасних діагностичних методів та засобів підвищення технічного рівня машин. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. 145. 174-178.
11. Колобов К. С. Дослідження впливу несправності систем та механізмів дизеля на його екологічні, енергетичні показники та температуру відпрацьованих

газів. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. 29 (68). № 1 (3). P. 103-108.

References (transliterated)

1. Bodnar B. E., Ochkasov O. B., Decyura O. Ya., Chernyaev D. V. (DIIT) Metodi nerozbirogo diagnostuvannya dizeliv pri eksploatacii ruhomogo skladu. *Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana*, 41, D. Vid-vo Dnipropetr. nac. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana, 2012. 321 s.
2. Zadvornov Ya. M., Ryazancev V. V. Osoblivosti vibroakustichnogo diagnostuvannya tekhnichnogo stanu spryazhen' detalej dizel'nih dviguniv. *Mekhanizaciya ta elektrifikaciya sil's'kogo gospodarstva*, 2016, 4, 175-185.
3. Konchakov E. I. Tekhnicheskaya diagnostika sudovih energeticheskikh ustanovok. Vladivostok. DVGUTU, 2007. 112 s.
4. Dviguni vnutrishn'ogo zgorannya: Seriya pidruchnikiv u 6 tomah. T.2. Dovidka konstrukcij forsovanih dviguniv nazemnih transportnih mashin. Za redakciyu prof. A.P. Marchenka, prof. A.F. SHEkhovcova – Harkiv. Vidavn. centr NTU “HPI”, 2004.
5. Patent na korisnu model' 2015 r. Nomer patentu: 103326 Data podannya zayavki: 18.06.2015 Data, z yakoi e chinimi prava: 10.12.2015 MPK: G01H 11/02 (2006.01), G01H 11/06 (2006.01) byul. № 23/2015.
6. Razrabotka sposoba opredeleniya sostava otrabotavshih gazov dvigatelej vnutrennogo sgoraniya i issledovanie kapillyarnyh kolonok s dioksidom kremniya dlya razdeleniya smesej uglevodorodov. Smirnov Petr Vladimirovich. *Special'nost' 05.11.11. Hromatografiya i hromatograficheskie pribory. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata himicheskikh nauk Moskva*. 2008.
7. Ved M. Feature Selection and Feature Extraction in Machine Learning: An Overview, 2018, 19, 7. Available at: <https://medium.com/@mehulved1503/featureselection-and-feature-extraction-in-machine-learning-an-overview-57891c595e96>.
8. Vasil'ev E. A., Prokopenko A. S. Metodika diagnostuvannya porshnevih dviguniv vnutrishn'ogo zgorannya za rezul'tatami ih nepryamogo vidobrazhennya. *Zbirnik naukovih prac' studentiv elektromekhanichnogo fakul'tetu*. – Poltava. PoltNTU, 2015, 6, pp. 184-192.
9. Nakonechnij A. J., Get'man O. L. Metodi ta zasobi diagnostuvannya roboti dviguna avtomobilya za ocinkoyu jogo vibroakustichnih harakteristik. *Visnik Nacional'nogo universitetu "L'vivs'ka politehnika". Seriya: Avtomatika, vimiryuvannya ta keruvannya*, 2018, 907, pp. 38-43.
10. SHHkregal' O. M., Limarenko V. O., Ril's'kij D. O. Zastosuvannya suchasnih diagnostichnih metodiv ta zasobiv pidvishchennya tekhnichnogo rivnya mashin. *Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo tekhnichnogo universitetu sil's'kogo gospodarstva im. P. Vasilenka*, 2014, 145, 174-178.
11. Kolobov K. S. Doslidzhennya vplivu nespravnostej sistem ta mekhanizmiv dizelya na jogo ekologichni, energetichni pokazniki ta temperaturu vidprac'ovanih gaziv. *Vcheni zapiski Tavrijs'kogo nacional'nogo universitetu im. V.I. Vernads'kogo. Seriya: Tekhnichni nauki*, 2018, 29(68), 1(3), pp. 103-108.

Відомості про авторів (About authors)

Білик Сергій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-8813-5652; e-mail: serhii.bilyk@khp.edu.ua.

Bilyk Serhii – Associate Professor of Engineering Science, NTU “KhPI”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8813-5652; e-mail: serhii.bilyk@khp.edu.ua.

Божко Едуард Валерійович – аспірант, НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; e-mail: eduardbozhko7585@gmail.com.

Bozhko Eduard – graduate student, NTU “KhPI”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: eduardbozhko7585@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Білик С. Ю., Божко Е. В. Аналіз методів та способів діагностування двигунів внутрішнього згорання методами нерозбірного контролю. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 3-8. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.01.

Please cite this article as:

Bilyk S., Bozhko E. Analysis of methods and methods of diagnosing internal combustion engines by non-assembly control methods. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2021, no. 4(10), pp. 3-8, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.01.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Белик С. Ю., Божко Э. В. Анализ методов и способов диагностирования двигателей внутреннего сгорания методами неразборного контроля. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серія: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 3-8. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.01.

АННОТАЦІЯ Рассмотрены вопросы взаимодействия схем диагностирования двигателей методами неразборного контроля, выполнен анализ существующих методов и предложено использование комплексных подходов, повышающих надежность работы двигателей. Проанализированы методы неразборного диагностирования с моделированием разрегулирования систем двигателя в процессе эксплуатации и выявления начальных признаков неисправностей конструктивного и функционального характера. Проведенный анализ позволил определить прямые диагностические параметры, непосредственно характеризующие состояние объекта и косвенные, связанные функциональными зависимостями с прямыми связями, и выделить наиболее эффективные, с точки зрения определения корреляционных зависимостей - прямые методы диагностирования, среди которых, например, индицирование рабочего процесса в цилиндре двигателя. Предлагается относительно простая схема организации измерения и охвата сигналов из нескольких элементов диагностирования одновременно: вибрационный метод, акустический метод, методы газовой хроматографии, косвенное индицирование посредством определения напряжения в штильках крышки цилиндров, оценка величины износа деталей по содержанию металла в моторном масле, а также диагностирование по неравномерности частоты вращения коленчатого вала. Анализ методов и способов диагностирования двигателей внутреннего сгорания позволил прийти к выводу, что метод диагностирования по неравномерности частоты вращения коленчатого вала двигателя представляет собой перспективное направление в развитии методов неразборного диагностирования двигателей внутреннего сгорания, использование которого позволит выполнить оценку технического состояния двигателя, выявлять и локализовать остаточный ресурс и осуществлять мониторинг технического состояния двигателя.

Ключевые слова: двигатели внутреннего сгорания; методы неразборного контроля; диагностика двигателей; газовая хроматография; оценка технического состояния двигателя

Надійшла (received) 27.11.2021

УДК 683.335.13

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.02

АНАЛІЗУВАННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ПОДАЧІ ПАЛИВА У ЦИЛІНДРИ СИЛОВОГО АГРЕГАТУ

А. М. БОРИСЕНКО^{1*}, О. Ф. ЄНІКІЄВ², Д. Ю. ЗАХАРЕНКОВ², І. С. ЗИКОВ³

¹ кафедра теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

² кафедра інтелектуальних систем прийняття рішень, Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, УКРАЇНА

³ кафедра обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: an.borisenko.khpi@gmail.com

АНОТАЦІЯ Запропоновано ідею моніторингу ідентичності циліндрових потужностей двигуна внутрішнього згоряння в умовах неповної інформації та на її основі побудовано комп'ютерну систему. Як вхідну інформацію використано сигнал миттєвої швидкості обертання колінчастого вала силового агрегату. При розробці архітектури апаратних засобів використано форсунки з п'єзоелектричними виконавчими механізмами, принцип безпосереднього цифрового керування, а також принцип керування зі зворотним зв'язком за станом флуктуацій швидкості обертання колінчастого вала. Як математичний апарат при аналізі структурної схеми комп'ютерної системи програмного керування процесами подачі палива та повітря у циліндри силового агрегату використано перетворення Лапласа. Побудовано математичні моделі компонентів апаратних засобів керування процесами подачі палив-повітряної суміші та у результаті аналізу структурної схеми комп'ютерної системи отримано передавальну функцію. Із використанням можливостей програмного середовища Matlab отримано перехідну та імпульсну перехідну характеристики системи, побудовано годограф Найквіста та встановлено логарифмічні амплітудно-частотні характеристики апаратних засобів. Встановлено, що частотні характеристики математичної моделі комп'ютерної системи мають необхідні динамічні характеристики. Методом розкладання на прості дроби отримано вираз дискретної передавальної функції, коефіцієнти степеневих поліномів якої встановлено за допомогою методу визначників та обчислювальних можливостей програмного середовища Mathcad. На основі дискретної передавальної функції побудовано схему комп'ютерного моделювання процесу оброблення апаратними засобами сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого вала. Комп'ютерним моделюванням отримано вихідний сигнал, у результаті аналізу якого встановлено швидкодію апаратних засобів оброблення вхідної інформації.

Ключові слова: апаратні засоби; сигнал флуктуацій; частотні характеристики; швидкодія; математичне та комп'ютерне моделювання

ANALYSIS OF THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF THE CONTROL SYSTEM FOR THE PROCESSES OF FUEL SUPPLY TO THE CYLINDERS OF THE POWER UNIT

A. BORYSENKO^{1*}, O. YENIKIEV², D. ZAKHARENKOV², I. ZYKOV³

¹ Department of theoretical foundations of electrical engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

² Department of intelligent decision making systems, Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, UKRAINE

³ Department of computer engineering and programming, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The idea of monitoring the identity of the cylinder capacities of an internal combustion engine under conditions of incomplete information is proposed and a computer system is built on its basis. The signal of the instantaneous rotation speed of the crankshaft of the power unit was used as input information. In the development of the hardware architecture, injectors with piezoelectric actuators, the principle of direct digital control, and the principle of control with feedback on the state of fluctuations of the crankshaft rotation speed were used. The Laplace transform was used as a mathematical apparatus for analyzing the structural diagram of a computer system for programmed control of the processes of supplying fuel and air to the cylinders of the power unit. Mathematical models of the components of the hardware for controlling the processes of supplying the fuel-air mixture were constructed, and as a result of the analysis of the structural diagram of the computer system, the transfer function was obtained. Using the capabilities of the Matlab software environment, the transient and impulse transient characteristics of the system are obtained, the Nyquist hodograph is constructed, and the logarithmic amplitude-frequency characteristics of the hardware are established. It was found that the frequency characteristics of the mathematical model of a computer system have the necessary dynamic characteristics. Using the method of expansion into simple fractions, an expression is obtained for a discrete transfer function, the coefficients of the power polynomials of which are established using the method of determinants and computational capabilities of the Mathcad software environment. On the basis of a discrete transfer function, a scheme for computer modeling of the process of processing the signal of the instantaneous speed of rotation of the crankshaft by hardware is constructed. The output signal was obtained by computer simulation, as a result of the analysis of which the speed of the hardware for processing the input information was established.

Keywords: hardware; fluctuation signal; frequency characteristics; speed; mathematical and computer modeling

Вступ

Техніко-економічні показники дизель-генераторів (ДГ) залежать від розподілу фаз процесів

подачі палива [1–3]. Відомий метод вимірювань індикаторних діаграм кожного циліндру та подальше порівняння з метою оцінювання їхньої ідентичності. Застосування ручної праці, достатньо велика кількість

циліндрів та відсутність вихідних електричних сигналів у первинних перетворювачів тиску суттєво обмежують продуктивність оцінювання ідентичності циліндрових потужностей ДГ. Пропонується ідея на основі опрацювання даних непрямих вимірювань розробити комп'ютерну систему (КС), що встановить ідентичність циліндрових потужностей двигуна. Як джерело вхідної інформації авторами пропонується використати частотно-модульований сигнал швидкості обертання колінчастого валу. За результатами моніторингу КС корегує процеси подачі паливо-повітряної суміші у циліндри [4]. Розв'язання цієї задачі забезпечить економію палива на рівні 5% [5,6], зменшить ймовірність перевантаження деяких циліндрів, суттєво збільшить термін використання силового агрегату й скоротить витрати на профілактику, обслуговування та ремонт.

Програмні рухи КС щодо керування процесами подачі паливо-повітряної суміші у циліндри силових агрегатів можна організувати за допомогою форсунок із електрогідравлічним або п'єзоелектричним виконуючим механізмом. Труднощі розв'язання цієї задачі зумовлено відсутністю апаратних засобів із заданою невизначеністю та швидкодією опрацювання частотно-модульованого сигналу, алгоритмічного та прикладного програмного забезпечення.

Мета роботи

Зменшення невизначеності та підвищення швидкодії апаратно-програмних засобів моніторингу ідентичності циліндрових потужностей ДГ на основі опрацювання даних непрямих вимірювань.

Виклад основного матеріалу

Встановити розподіл циліндрових потужностей ДГ ЗТД-1 можливо на основі опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу. За результатами оцінювання апаратні засоби корегують процеси подачі паливо-повітряної суміші у циліндри. Синхронізацію роботи КС із фазою обертання колінчастого валу силового агрегату забезпечує сигнал верхньої мертвої точки першого циліндру. Використано форсунки із п'єзоелектричним керуванням для задавання процесів подачі паливо-повітряної суміші. Структурну схему апаратних засобів наведено на рис. 1. Архітектуру КС складають такі компоненти: давач миттєвої швидкості обертання колінчастого валу (ДЧ), вимірювальний перетворювач (ВП), давач верхньої мертвої точки першого циліндру (ДВМТ), обчислювальний пристрій (мікроЕОМ) та три виконавчі механізми (ВМ1, ВМ2 та ВМ3).

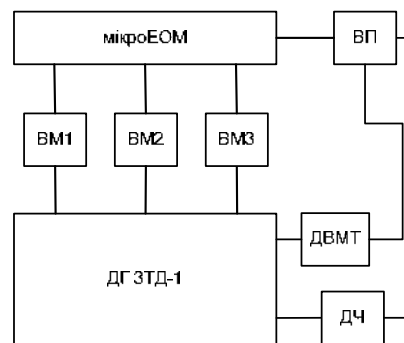


Рис.1 – Архітектура КС

При розробці архітектури КС використано принцип керування зі зворотнім зв'язком за станом сигналу флуктуацій швидкості обертання колінчастого валу. Алгоритмічне забезпечення обчислювальної процедури оцінювання ідентичності циліндрових потужностей ДГ ЗТД-1 передбачає виконання наступних дій:

- вимірювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу;
- усереднення інформації та формування вибірки у межах одного оберту колінчастого валу;
- отримання масиву дискретних значень сигналу флуктуацій;
- побудова детермінованої математичної моделі крутної схеми ДГ ЗТД-1;
- апроксимація крутних моментів циліндрів;
- розв'язання детермінованої системи лінійних диференціальних рівнянь рухів мас моделі;
- встановлення відхилень від середнього значення циліндрової потужності;
- формування сигналів програмного керування ВМ1, ВМ2 та ВМ3.

Використаємо перетворення Лапласу для подальших досліджень [7–9]. Передавальну функцію каналу КС отримаємо методом структурних перетворень схеми [10,11]. Динамічні властивості форсунок із п'єзоелектричним керуванням дозволяють подати її аперіодичним ланцюгом, який має наступну передавальну функцію [12]

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}, \quad (1)$$

де K_1 - статичний коефіцієнт посилення, T_1 - постійна часу.

Імпульсні сигнали із заданими фазами та тривалістю керують ВМ1...ВМ3. МікроЕОМ формує сигнали «старт» та сигнали «стоп», які подаються відповідно на «S» та «R» входи тригерів. Динамічні властивості блоків ВМ при перетворенні вхідної інформації дозволяють подати їх аперіодичним ланцюгом, який має таку передавальну функцію [12]

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, \quad (2)$$

де $k_2 = 0.1$ - коефіцієнт посилення блоку мікроЕОМ, $T_2 = 0.0021 C$ - постійна часу.

Передавальна функція екстраполятора нульового порядку має вигляд [12]

$$W_3(p) = \frac{\tau_3}{\tau_3 p + 1}, \quad (3)$$

де τ_3 - запізнення.

Затримкою на спрацьовування RS-тригерів нехтуємо (приблизно 10 нС). Відповідно цей блок подаємо пропорційним ланцюгом із такою передавальною функцією

$$W_4(p) = 1. \quad (4)$$

Блок мікроЕОМ на основі опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу встановлює ідентичність циліндрових потужностей силового агрегату. При наявності їхніх коливань виконує відповідне корегування часу надходжень імпульсів «старт-стоп». Обчислювальні процедури займають деякий проміжок часу, тривалість якого розраховується на підставі кількості команд керуючої програми та тактової частоти системного генератора. Тому блок мікроЕОМ при виконанні обчислювальних процедур подаємо у вигляді пропорційного ланцюга із запізненням [12]. Відповідно, його передавальна функція отримала наступний вигляд

$$W_5(p) = k_5 e^{-p\tau_5}, \quad (5)$$

де $\tau_5 = 0.01 C$ - запізнення, $k_5 = 10$ - коефіцієнт перетворення.

За умови обмеження кількості складових подання експоненти останній вираз набуває вигляду

$$W_5(p) = \frac{k_5}{\tau_5 p + 1}, \quad (6)$$

Динамічні властивості блоку ВП сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу ДГ дозволяють його подання у вигляді пропорційного ланцюга із запізненням [12]. Відповідно передавальна функція ВП має наступний вигляд

$$W_6(p) = k_6 e^{-p\tau_6} = \frac{k_6}{\tau_6 p + 1}, \quad (7)$$

де $k_6 = 2.604 \cdot 10^6$ - коефіцієнт перетворення блоку ВП; $\tau_6 = 0.051 C$ - запізнення.

Апаратні засоби програмного керування процесами подачі паливно-повітряної суміші у циліндри ДГ ЗТД-1, математичні моделі яких отримано, з'єднано послідовно. Тому їхня передавальна функція є добуток отриманих функцій і має такий вигляд

$$W_7(p) = k_1 e^{-pT_1} k_2 e^{-pT_2} \tau_3 e^{-p\tau_3} k_3 e^{-p\tau_4} k_4 e^{-p\tau_5} k_5 e^{-p\tau_6}, \quad (8)$$

або наступний

$$W_7(p) = \frac{k_1 k_2 \tau_3 k_3 k_4 k_5}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(\tau_3 p + 1)(\tau_4 p + 1)(\tau_5 p + 1)} \quad (9)$$

Дослідження АЧХ каналів передавання крутних моментів окремих циліндрів ДГ ЗТД-1 проведемо на основі використання передавальних функцій, параметри яких подано у безрозмірному вигляді. У відповідності з цим останні вирази також потрібно подати у безрозмірному вигляді. Нормування коефіцієнту перетворення апаратних засобів програмного керування процесами подачі паливно-повітряної суміші проведемо наступним чином

$$k_1 k_2 \tau_3 k_5 = 1. \quad (10)$$

Після нескладних математичних перетворень виразу (9) отримаємо таке співвідношення

$$W_8(p) = \frac{k_6}{a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (11)$$

де коефіцієнти знаменника визначаються наступним чином

$$\begin{aligned} a_4 &= T_2 \tau_3 \tau_5 \tau_6 + T_1 \tau_3 \tau_5 \tau_6 + T_1 T_2 \tau_5 \tau_6 + T_1 T_2 \tau_3 \tau_5 + T_1 T_2 \tau_3 \tau_6; \\ a_3 &= \tau_3 \tau_5 \tau_6 + T_2 \tau_5 \tau_6 + T_2 \tau_3 \tau_6 + T_2 \tau_3 \tau_5 + T_1 \tau_5 \tau_6 + T_1 \tau_3 \tau_6 + \\ &+ T_1 \tau_3 \tau_5 + T_1 T_2 \tau_6 + T_1 T_2 \tau_5 + T_1 T_2 \tau_3; \\ a_2 &= \tau_5 \tau_6 + \tau_3 \tau_6 + \tau_3 \tau_5 + T_2 \tau_6 + T_2 \tau_5 + T_2 \tau_3 + T_1 \tau_6 + \\ &+ T_1 \tau_5 + T_1 T_2 + T_1 \tau_3; \\ a_1 &= T_1 T_2 \tau_3 \tau_5 \tau_6; \quad a_0 = 1. \end{aligned}$$

Методику досліджень частотних характеристик апаратних засобів КС керування процесами подачі паливно-повітряної суміші у циліндри ДГ ЗТД-1 розроблено на основі використання можливостей програмного середовища Matlab [13,14]. Командний рядок задавання виразу передавальної функції має наступний вигляд: $W = \text{tf}([1], [a_5 \ a_4 \ a_3 \ a_2 \ a_1 \ 1])$. Результати розрахунків частотних характеристик каналу КС подано на рис. 2-6 у вигляді графіків:

- діаграма Bode каналу КС;
- перехідна функція математичної моделі апаратних засобів;
- імпульсна перехідна функція;
- частотний годограф Найквіста;
- запас стійкості за амплітудою та фазою.

Для обчислень дискретної передавальної функції апаратних засобів опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу, розкладемо вираз (11) на прості дроби [11]

$$W_9(p) = \frac{A_1 T_1}{p + T_1^{-1}} + \frac{A_2 T_2}{p + T_2^{-1}} + \frac{A_3 \tau_3}{p + \tau_3^{-1}} + \frac{A_4 \tau_5}{p + \tau_5^{-1}} + \frac{A_5 \tau_6}{p + \tau_6^{-1}},$$

де A_i - коефіцієнти, які потрібно встановити.

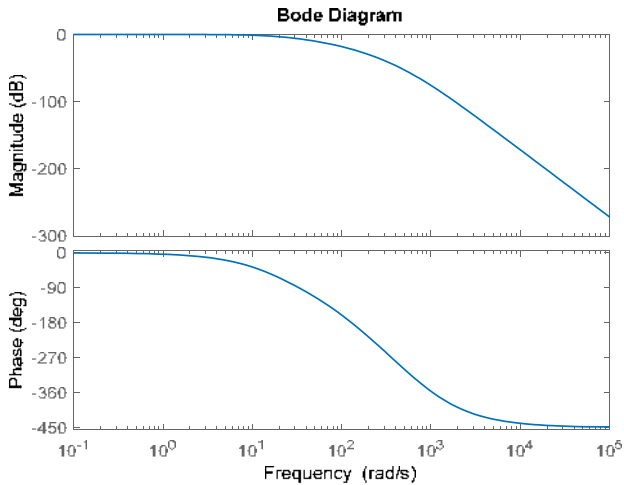


Рис. 2 – Діаграма Bode

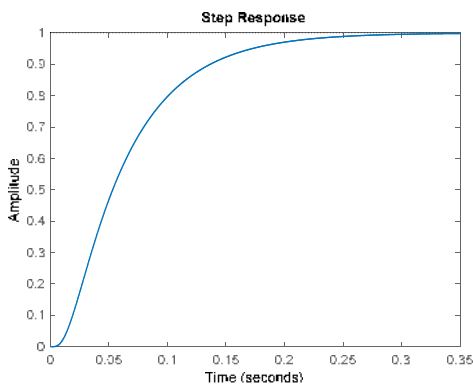


Рис. 3 – Перехідна функція КС

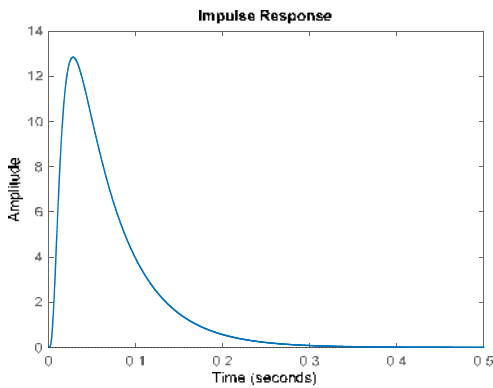


Рис. 4 – Імпульсна перехідна функція

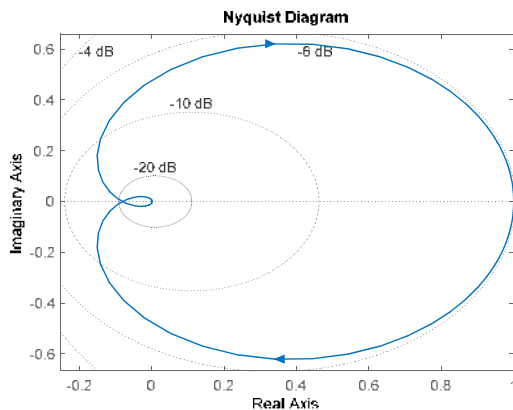


Рис. 5 – Частотний годограф Найквіста

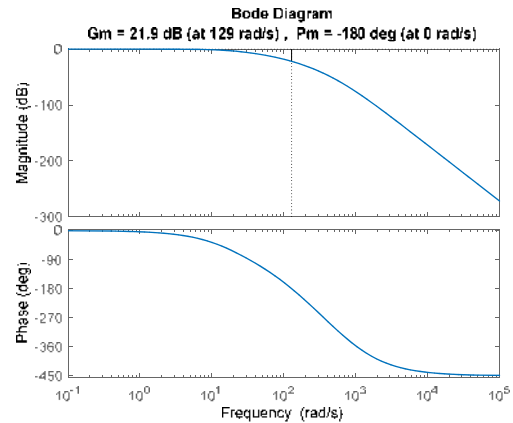


Рис. 6 – Визначення запасу стійкості за амплітудою та фазою

Процедура пошуку коефіцієнтів чисельника й знаменника передавальної функції передбачає виконання наступних дій:

- приводимо вираз до загального знаменника;
- система алгебраїчних рівнянь утворюється шляхом порівняння ступеневих поліномів чисельників виразу (11) та останнього співвідношення.

Після математичних перетворень отримано систему алгебраїчних рівнянь у такому вигляді

$$\begin{cases} b_{11}A_1 + b_{12}A_2 + b_{13}A_3 + b_{14}A_4 + b_{15}A_5 = 2.604 \cdot 10^6 \\ b_{21}A_1 + b_{22}A_2 + b_{23}A_3 + b_{24}A_4 + b_{25}A_5 = 0 \\ b_{31}A_1 + b_{32}A_2 + b_{33}A_3 + b_{34}A_4 + b_{35}A_5 = 0 \\ b_{41}A_1 + b_{42}A_2 + b_{43}A_3 + b_{44}A_4 + b_{45}A_5 = 0 \\ b_{51}A_1 + b_{52}A_2 + b_{53}A_3 + b_{54}A_4 + b_{55}A_5 = 0, \end{cases} \quad (12)$$

де коефіцієнти системи рівнянь визначаються за допомогою наступних виразів

$$\begin{aligned} b_{11} &= \frac{T_1}{T_2 \tau_3 \tau_6 \tau_5}, \quad b_{12} = \frac{T_2}{T_1 \tau_3 \tau_6 \tau_5}, \quad b_{13} = \frac{\tau_3}{T_1 T_2 \tau_6 \tau_5}, \\ b_{14} &= \frac{\tau_5}{T_1 T_2 \tau_3 \tau_6}, \quad b_{15} = \frac{\tau_6}{T_1 T_2 \tau_3 \tau_5}; \\ b_{21} &= \frac{T_1(T_2 + \tau_3 + \tau_6 + \tau_5)}{T_2 \tau_3 \tau_6 \tau_5}, \quad b_{22} = \frac{T_2(T_1 + \tau_3 + \tau_6 + \tau_5)}{T_1 \tau_3 \tau_6 \tau_5}, \\ b_{23} &= \frac{\tau_3(T_1 + T_2 + \tau_6 + \tau_5)}{T_1 T_2 \tau_6 \tau_5}, \quad b_{24} = \frac{\tau_5(T_1 + T_2 + \tau_3 + \tau_6)}{T_1 T_2 \tau_3 \tau_6}, \\ b_{25} &= \frac{\tau_6(T_1 + T_2 + \tau_3 + \tau_5)}{T_1 T_2 \tau_3 \tau_5}; \\ b_{31} &= \frac{T_1(T_2 \tau_5 + \tau_3 \tau_5 + T_2 \tau_6 + \tau_3 \tau_6 + \tau_6 \tau_5 + T_2 \tau_3)}{T_2 \tau_3 \tau_6 \tau_5}, \\ b_{32} &= \frac{T_2(T_1 \tau_5 + \tau_3 \tau_5 + T_1 \tau_6 + \tau_3 \tau_6 + \tau_6 \tau_5 + T_1 \tau_3)}{T_1 \tau_3 \tau_6 \tau_5}, \\ b_{33} &= \frac{\tau_3(T_2 \tau_5 + T_1 \tau_5 + T_2 \tau_6 + T_1 \tau_6 + \tau_6 \tau_5 + T_1 T_2)}{T_1 T_2 \tau_6 \tau_5}, \end{aligned}$$

$$b_{34} = \frac{\tau_5(T_1T_2 + T_1\tau_3 + T_2\tau_6 + \tau_3\tau_6 + T_1\tau_6 + T_2\tau_3)}{T_1T_2\tau_3\tau_6},$$

$$b_{35} = \frac{\tau_6(T_2\tau_5 + \tau_3\tau_5 + T_1T_2 + T_1\tau_3 + T_1\tau_5 + T_2\tau_3)}{T_1T_2\tau_3\tau_5},$$

$$b_{41} = \frac{T_1(\tau_3\tau_5\tau_6 + T_2\tau_6\tau_5 + T_2\tau_3\tau_6 + T_2\tau_3\tau_6)}{T_2\tau_3\tau_6T_5},$$

$$b_{42} = \frac{T_2(\tau_3\tau_6\tau_5 + T_1\tau_6\tau_5 + T_1\tau_3\tau_6 + T_1\tau_3\tau_5)}{T_1\tau_3\tau_6\tau_5},$$

$$b_{43} = \frac{\tau_3(T_2\tau_6\tau_5 + T_1\tau_6\tau_5 + T_1T_2\tau_5 + T_1T_2\tau_6)}{T_1T_2\tau_6\tau_5},$$

$$b_{44} = \frac{\tau_5(T_1T_2\tau_3 + T_1T_2\tau_6 + T_1\tau_3\tau_6 + T_2\tau_3\tau_6)}{T_1T_2\tau_3\tau_6},$$

$$b_{45} = \frac{\tau_6(T_1T_2\tau_3 + T_1T_2\tau_5 + T_2\tau_3\tau_5 + T_1\tau_3\tau_5)}{T_1T_2\tau_3\tau_5},$$

$$b_{51} = T_1, \quad b_{52} = T_2, \quad b_{53} = \tau_3, \quad b_{54} = \tau_5, \quad b_{55} = \tau_6.$$

Для розрахунку величин коефіцієнтів A_i використаємо метод визначників та можливості програмного середовища Mathcad [15]. Скрипти розрахунку цих коефіцієнтів подано на рис. 7.

$$\Delta = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} \end{vmatrix} = -1.609 \times 10^{14}$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 2.604 \cdot 10^6 & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ 0 & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ 0 & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ 0 & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} \\ 0 & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} \end{vmatrix} = -1.78 \times 10^{13}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} b_{11} & 2.604 \cdot 10^6 & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & 0 & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & 0 & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & 0 & b_{43} & b_{44} & b_{45} \\ b_{51} & 0 & b_{53} & b_{54} & b_{55} \end{vmatrix} = 1.164 \times 10^{13}$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & 2.604 \cdot 10^6 & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & 0 & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & 0 & b_{44} & b_{45} \\ b_{51} & b_{52} & 0 & b_{54} & b_{55} \end{vmatrix} = -1.269 \times 10^{12}$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 2.604 \cdot 10^6 & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & 0 & b_{45} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & 0 & b_{55} \end{vmatrix} = 8.286 \times 10^{12}$$

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & 2.604 \cdot 10^6 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & 0 \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & 0 \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & 0 \end{vmatrix} = -8.576 \times 10^{11}$$

$$A_1 := \frac{\Delta_1}{\Delta} = 0.111 \quad A_2 := \frac{\Delta_2}{\Delta} = -0.072$$

$$A_3 := \frac{\Delta_3}{\Delta} = 7.888 \times 10^{-3} \quad A_4 := \frac{\Delta_4}{\Delta} = -0.052$$

$$A_5 := \frac{\Delta_5}{\Delta} = 5.332 \times 10^{-3}$$

Рис. 7 – Скрипти розрахунку коефіцієнтів

З метою спрощення математичних перетворень при отриманні дискретної передавальної функції введемо наступні позначення

$$l_1 = e^{-T_0/T_1}, \quad l_2 = e^{-T_0/T_2}, \quad l_3 = e^{-T_0/T_3},$$

$$l_4 = e^{-T_0/T_4}, \quad l_5 = e^{-T_0/T_5},$$

де $T_0 = 0.0005$ с – шаг ітерацій.

При встановленні дискретної передавальної функції апаратних засобів опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу ДГ ЗТД-1 скористаємось таблицею z-перетворень. Після нескладних математичних перетворень її отримано у вигляді відношення двох ступеневих поліномів

$$W_{10}(z) = \frac{b_4^{\circ}z^5 + b_3^{\circ}z^4 + b_2^{\circ}z^3 + b_1^{\circ}z^2 + b_0^{\circ}z}{a_5^{\circ}z^5 + a_4^{\circ}z^4 + a_3^{\circ}z^3 + a_2^{\circ}z^2 + a_1^{\circ}z + a_0^{\circ}}, \quad (13)$$

$$b_0^{\circ} = A_1l_2l_3l_4l_5 + A_2l_1l_3l_4l_5 + A_3l_1l_2l_4l_5 + A_4l_1l_2l_3l_5 + A_5l_1l_2l_3l_4;$$

$$b_1^{\circ} = -[A_1(l_2l_3l_4 + l_2l_3l_5 + l_2l_4l_5 + l_3l_4l_5) + A_2(l_1l_3l_4 + l_1l_3l_5 + l_1l_4l_5 + l_3l_4l_5) + A_3(l_1l_2l_4 + l_1l_2l_5 + l_1l_4l_5 + l_2l_4l_5) + A_4(l_1l_2l_3 + l_1l_2l_5 + l_1l_3l_5 + l_2l_3l_5) + A_5(l_1l_2l_3 + l_1l_2l_4 + l_1l_3l_4 + l_2l_3l_4)];$$

$$b_2^{\circ} = A_1(l_2l_3 + l_2l_4 + l_2l_5 + l_3l_4 + l_3l_5) + A_2(l_1l_3 + l_1l_4 + l_1l_5 + l_3l_4 + l_3l_5) + A_3(l_1l_2 + l_1l_4 + l_1l_5 + l_2l_4 + l_2l_5) + A_4(l_1l_2 + l_1l_3 + l_1l_5 + l_2l_3 + l_2l_5) + A_5(l_1l_2 + l_1l_3 + l_1l_4 + l_2l_3 + l_2l_4);$$

$$b_3^{\circ} = -[A_1(l_2 + l_3 + l_4 + l_5) + A_2(l_1 + l_3 + l_4 + l_5) + A_3(l_1 + l_2 + l_4 + l_5) + A_4(l_1 + l_2 + l_3 + l_5) + A_5(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)];$$

$$b_4^{\circ} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5, \quad a_0^{\circ} = -l_1l_2l_3l_4l_5;$$

$$a_1^{\circ} = l_1l_2l_3l_4 + l_1l_2l_3l_5 + l_1l_2l_4l_5 + l_1l_3l_4l_5 + l_2l_3l_4l_5;$$

$$a_2^{\circ} = -l_1l_2l_3 - l_1l_2l_4 - l_1l_2l_5 - l_1l_3l_4 - l_1l_3l_5 - l_1l_4l_5 - l_2l_3l_4 - l_2l_3l_5 - l_2l_4l_5 - l_3l_4l_5;$$

$$a_3^{\circ} = l_1l_2 + l_1l_3 + l_1l_4 + l_1l_5 + l_2l_3 + l_2l_4 + l_2l_5 + l_3l_4 + l_3l_5 + l_4l_5,$$

$$a_4^{\circ} = -(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5), \quad a_5^{\circ} = 1.$$

Блок мікроЕОМ вносить суттєве запізнення в роботу апаратних засобів опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу ДГ ЗТД-1. Будемо вважати, що дискретний час запізнення апаратних засобів за вхідним сигналом становить T_0 . Цей час дорівнює запізненню блоку мікроЕОМ, відповідно порядок математичної моделі становить $d = 2$. Із урахуванням цього запізнення дискретна передавальна функція апаратних засобів вийшла у такому вигляді

$$W_{11}(z) = \frac{b_4^{\circ}z^4 + b_3^{\circ}z^3 + b_2^{\circ}z^2 + b_1^{\circ}z + b_0^{\circ}}{a_5^{\circ}z^5 + a_4^{\circ}z^4 + a_3^{\circ}z^3 + a_2^{\circ}z^2 + a_1^{\circ}z + a_0^{\circ}}. \quad (14)$$

Після підстановки коефіцієнтів поліномів у останній вираз та математичних перетворень отримаємо дискретну передавальну функцію апаратних засобів опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу ДГ ЗТД-1 у такому вигляді

$$W_{12}(z) = \frac{4.3 \cdot 10^{-5}z^4 - 1.6 \cdot 10^{-4}z^3 + 1.09 \cdot 10^{-4}z^2 - 2.69 \cdot 10^{-5}z}{z^5 - 4.20z^4 + 7.02z^3 - 5.82z^2 + 2.39z - 0.39}.$$

На основі цього виразу зібрано схему комп'ютерного моделювання процесу опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу ДГ ЗТД-1 (рис. 8).

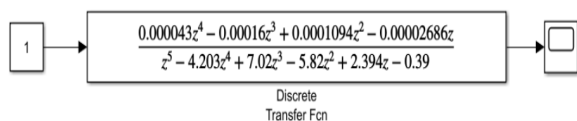


Рис. 8 - Схема комп'ютерного моделювання

У результаті комп'ютерного моделювання у програмному середовищі Matlab отримано вихідний сигнал апаратних засобів моніторингу ідентичності циліндрових потужностей ДГ ЗТД-1 (рис. 9).

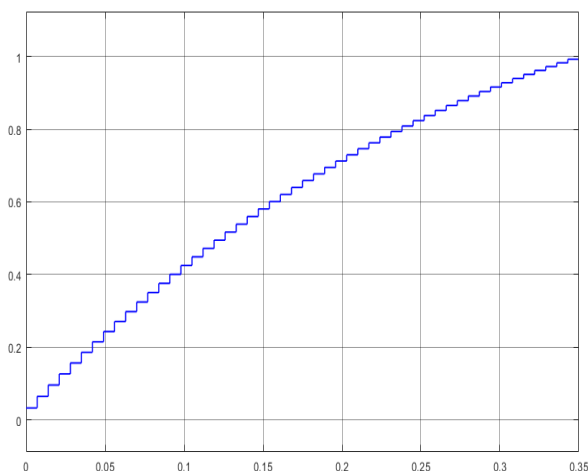


Рис. 9 - Результати комп'ютерного моделювання

Обговорення результатів

Час опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу апаратними засобами склав 0.33 с, що задовольняє вимогам КС за швидкістю перетворення. Вигляд вхідного сигналу схеми комп'ютерного моделювання – аперіодичний. Порівняння графіків рис. 3 та рис. 9 свідчить, що перехід до дискретної передавальної функції виконано достатньо коректно.

Висновки

На основі принципу керування зі зворотнім зв'язком за станом сигналу флуктуацій швидкості обертання колінчастого валу розроблено КС керування процесами подачі паливно-повітряної суміші у циліндри ДГ ЗТД-1 за умов неповної інформації. Розроблено інформаційну технологію опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу силового агрегату.

Використано математичний апарат перетворення Лапласа для побудови математичних моделей компонент апаратних засобів. На основі методу структурних перетворень отримано передавальну функцію КС керування процесами подачі паливно-повітряної суміші.

Розроблено методику досліджень частотних характеристик апаратних засобів КС із використанням можливостей програмного середовища Matlab. Отримано перехідну функцію математичної моделі апаратних засобів керування процесами подачі паливно-повітряної суміші у циліндри ДГ ЗТД-1, імпульсну перехідну функцію, частотний годограф Найквіста та встановлено запас стійкості системи за амплітудою та фазою. Встановлено, що частотні характеристики апаратних засобів КС мають необхідні динамічні властивості.

Отримано дискретну передавальну функцію КС керування процесами подачі паливно-повітряної суміші у циліндри ДГ ЗТД-1. У програмному середовищі Matlab із розширенням побудовано схему комп'ютерного моделювання процесу опрацювання сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу. У результаті аналізування її вихідного сигналу встановлено, що апаратні засоби керування процесами подачі паливно-повітряної суміші відповідають вимогам щодо невизначеності та швидкодії перетворення інформації.

Список літератури

1. Challen B., Baranescu R. *Diesel Engine Reference Book*. 2nd edition. Butterworth-Heinemann, 1999. 682 p.
2. Gawande S., Navale L., Nandgaonkar M., Butala D., Kunamalla S. Cylinder Imbalance Detection of Six Cylinder DI Diesel Engine Using Pressure Variation. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2010. Vol. 2(3). P. 433–441.
3. Gawande S., Navale L., Nandgaonkar M., Butala D. Harmonic Frequency Analysis of Multi-Cylinder Inline Diesel Engine Genset for Detecting Imbalance. *International Review of Mechanical Engineering*. 2009. Vol. 3. No. 6. P. 782–787.
4. Enikeev A. F., Borisenko A. N., Samsonov V. P., Kiseleva G. M. Diagnosis of a diesel generator by the deviation in shaft speed. *Measurement techniques USSR*. 1988. Vol. 31. Iss. 9. P. 868–871. doi: 10.1007/BF00863884.
5. Боднар Б. Є., Очкасов О. Б., Черняев Д. В. Визначення методу фільтрації сигналу нерівномірності частоти обертання колінчастого валу дизеля. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2013. Вип. 1(43). С. 113–118.
6. Грачев В. В. Экспериментальная оценка метода диагностирования дизельных двигателей по неравномерности вращения коленчатого вала. *Прогрессивные процессы технологической эксплуатации автомобилей. МАДИ*. Москва: 1982. С. 46–50.
7. Anetor L., Osakue E., Odetunde Ch. Combustion Dynamics at the Top Dead Center Position of a Spark Ignition Engine. *FME Transactions*. 2017. Vol. 45. No 4. P. 548–558. doi: 10.5937/fmet1704548A.
8. Gritsenko A., Shepelev V., Zadorozhnaya E., Almetova Z., Burzev A. The Advancement of Methods of Vibro-Acoustic Control of ICE Gas Distribution Mechanism. *FME Transactions*. 2020. Vol. 48. No. 1. P. 127–136. doi: 10.5937/fmet2001127G.
9. Salinic S., Vranic A., Nestic N., Tomovic A. On the Torque Transmission by a Cardan-Hooke Joint. *FME Transactions*.

2017. Vol. 45. No 1. P. 117–121. doi: 10.5937/fmet1701117S.
- Dorf R., Bishop R. *Modern Control Systems*. Addison: Wesley: Prentice Hall, 2010. 1104 p.
 - Yenikieiev O., Scherbak L. Information technology for protecting diesel-electric station reliable operation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No. 4. P. 85–91. doi:10.15407/techned2019.04.085.
 - Yenikieiev O., Isikova N., Korotenko Ye., Reshetnyak T. Analysis of characteristics of hardware means for software control of the longitudinal feed of the grinding wheel. *Acta Technica Naposensis*. 2020. Mol. 63. Iss. 11. P. 149–158.
 - Дьяконов В. П. *Matlab u Simulink dlya radioinzhenerov*. Москва: ДМК Пресс, 2011. 976 с.
 - Дьяконов В. П. *Mathcad 8-12 dlya studentov*. Москва: СОЛОН-Пресс, 2010. 632 с.
 - Лазарев Ю. П. *Моделирование процессов и систем в Matlab: Учебный курс*. Киев: Изд. группа BHV, 2005. 512 с.
 - Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 2013. Iss. 1(43), pp. 113–118.
 - Grachev V. V. Eksperimental'naya otsenka metoda diagnostirovaniya dizel'nykh dvigateley po neravnomernosti vrashcheniya kolenchatogo vala [Experimental evaluation of the method for diagnosing diesel engines by uneven rotation of the crankshaft]. *Progressivnyye protsessy tekhnologicheskoy ekspluatatsii avtomobiley. MADI [Progressive processes of technological operation of cars]*. Moscow, 1982, pp. 46–50.
 - Anetor L., Osakue E., Odetunde Ch. Combustion Dynamics at the Top Dead Center Position of a Spark Ignition Engine. *FME Transactions*, 2017, Vol. 45, no 4, pp. 548–558, doi: 10.5937/fmet1704548A.
 - Gritsenko A., Shepelev V., Zadorozhnaya E., Almetova Z., Burzev A. The Advancement of Methods of Vibro-Acoustic Control of ICE Gas Distribution Mechanism. *FME Transactions*, 2020, Vol. 48, no 1, pp. 127–136, doi: 10.5937/fmet2001127G.
 - Salinic S., Vranic A., Nestic N., Tomovic A. On the Torque Transmission by a Cardan-Hooke Joint. *FME Transactions*, 2017, Vol. 45, no 1, pp. 117–121, doi:10.5937/fmet1701117S.
 - Dorf R., Bishop R. *Modern Control Systems*. Addison: Wesley: Prentice Hall, 2010, 1104 p.
 - Yenikieiev O., Scherbak L. Information technology for protecting diesel-electric station reliable operation. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2019, no 4, pp. 85–91, doi: 10.15407/techned2019.04.085.
 - Yenikieiev O., Isikova N., Korotenko Ye., Reshetnyak T. Analysis of characteristics of hardware means for software control of the longitudinal feed of the grinding wheel. *Acta Technica Naposensis*, 2020, Vol. 63, Iss. 11, pp. 149–158.
 - D'yakonov V. P. *Matlab i Simulink dlya radioinzhenerov [Matlab and Simulink for Radio Engineers]*. Moscow, 2011, 976 p.
 - D'yakonov V. P. *Mathcad 8-12 dlya studentov [Mathcad 8-12 for students]*. Moscow, 2010, 632 p.
 - Lazarev Yu. P. *Modelirovaniye protsessov i sistem v Matlab: Uchebnyy kurs [Modeling Processes and Systems in Matlab: Tutorial]*. Kyiv, 2005, 512 p.

References (transliterated)

- Challen B., Baranescu R. *Diesel Engine Reference Book*. 2nd edition. Butterworth-Heinemann, 1999, 682 p.
- Gawande S., Navale L., Nandgaonkar M., Butala D., Kunamalla S. Cylinder Imbalance Detection of Six Cylinder DI Diesel Engine Using Pressure Variation. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, Vol. 2(3). pp. 433–441.
- Gawande S., Navale L., Nandgaonkar M., Butala D. Harmonic Frequency Analysis of Multi-Cylinder Inline Diesel Engine Genset for Detecting Imbalance. *International Review of Mechanical Engineering*, 2009, Vol. 3, no. 6, pp. 782–787.
- Enikeev A. F., Borisenko A. N., Samsonov V. P., Kiseleva G. M. Diagnosis of a diesel generator by the deviation in shaft speed. *Measurement techniques USSR*, 1988, Vol. 31, Iss.9, pp. 868–871, doi: 10.1007/BF00863884.
- Bodnar B. Ye., Ochkasov O. B., Chernyayev D. V. Vyznachennya metodu fil'tratsiyi syhnalu nerivnomirnosti chastoty obertannya kolinchatoho valu dyzelya [Determination of the method of filtering the signal of non-uniformity of the crankshaft speed of the diesel engine].

Відомості про авторів (About authors)

Борисенко Анатолій Миколайович – доктор технічних наук, професор, кафедра теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-002-9160-4488; e-mail: an.borisenko.khpi@gmail.com

Borysenko Anatoliy – doctor of technical sciences, professor, department of theoretical foundations of electrical engineering, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-002-9160-4488; e-mail: IvLV@mail.ua.

Енікеєв Олександр Фанілович – доктор технічних наук, доцент, кафедра інтелектуальних систем прийняття рішень, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна; ORCID: 0000-0001-8633-3233; e-mail: Al_enikeev@bigmir.net

Yenikieiev Oleksandr – doctor of technical sciences, docent, department of intelligent decision making systems, Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8633-3233; e-mail: Al_enikeev@bigmir.net

Захаренков Дмитро Юрійович – кафедра інтелектуальних систем прийняття рішень, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна; ORCID: 0000-0003-3951-022X; e-mail: Dmit.zakharen@gmail.com

Zakharenkov Dmitry – department of intelligent decision making systems, Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3951-022X; e-mail: Dmit.zakharen@gmail.com

Зиков Ігор Семенович – кандидат технічних наук, доцент, кафедра обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8884-2715; e-mail: i.s.zykov@gmail.com

Zykov Ihor – candidate of technical sciences, associate professor, department of computer engineering and programming, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8884-2715; e-mail: i.s.zykov@gmail.com

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Борисенко А. М., Єнікєєв О. Ф., Захаренков Д. Ю., Зыков И. С. Аналізування частотних характеристик системи керування процесами подачі палива у циліндри силового агрегату. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 9-16. doi: 10.20998/2413-4295.2021.04.02.

Please cite this article as:

Borysenko A., Yenykiiyev O., Zakharenkov D., Zykov I. Analysis of the frequency characteristics of the control system for the processes of fuel supply to the cylinders of the power unit. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4 (10), pp. 9-16, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.02.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Борисенко А. Н., Еникеев А. Ф., Захаренков Д. Ю., Зыков И. С. Анализ частотных характеристик системы управления процессами подачи топлива в цилиндры силового агрегата. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 9-16. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.02.

АННОТАЦІЯ Предложено идею мониторинга идентичности цилиндрических мощностей у двигателя внутреннего сгорания в условиях неполной информации и на ее основе построена компьютерная система. В качестве входной информации использован сигнал мгновенной скорости вращения коленчатого вала силового агрегата. При разработке архитектуры аппаратных средств использованы форсунки с пьезоэлектрическими исполнительными механизмами, принцип непосредственного цифрового управления, а также принцип управления с обратной связью по состоянию флуктуаций скорости вращения коленчатого вала. В качестве математического аппарата при анализе структурной схемы компьютерной системы программного управления процессами подачи топлива и воздуха в цилиндры силового агрегата использовано преобразование Лапласа. Построены математические модели компонент аппаратных средств управления процессами подачи топливовоздушной смеси и в результате анализа структурной схемы компьютерной системы получена передаточная функция. С использованием возможностей программной среды Matlab получены переходная и импульсная переходная характеристики системы, построен годограф Найквиста и установлены логарифмические амплитудно-частотные характеристики аппаратных средств. Установлено, что частотные характеристики математической модели компьютерной системы обладают необходимыми динамическими характеристиками. Методом разложения на простые дроби получено выражение дискретной передаточной функции, коэффициенты степенных полиномов которой установлены с помощью метода определителей и вычислительных возможностей программной среды Mathcad. На основе дискретной передаточной функции построена схема компьютерного моделирования процесса обработки аппаратными средствами сигнала мгновенной скорости вращения коленчатого вала. Компьютерным моделированием получен выходной сигнал, в результате анализа которого установлено быстроедействие аппаратных средств обработки входной информации.

Ключевые слова: аппаратные средства; сигнал флуктуаций; частотные характеристики; быстроедействие; математическое и компьютерное моделирование

Надійшла (received) 08.11.2021

УДК 621.318

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.03

ЗАСТОСУВАННЯ ТА СХЕМИ ПОПЕРЕДНЬОГО ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ У МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНІЙ ОБРОБЦІ МЕТАЛІВ

Т. В. ГАВРИЛОВА, Є. О. ЧАПЛИГІН*, С. О. ШИНДЕРУК

кафедра фізики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, УКРАЇНА

* e-mail: chaplygin_e_a@gmail.com

АНОТАЦІЯ Виділено особливості процесів магнітно-імпульсної обробки металів у традиційних схемах технологічних процесів сучасного промислового виробництва. Робота є коротким описом стану, застосування, а також запропоновано схеми попереднього індукційного нагріву в промисловій магнітно-імпульсній обробці металів. Розглянуто спосіб підвищення ефективності виконання заданих виробничих операцій. Використання попереднього нагріву призводить до суттєвого підвищення якості виконання виробничих операцій при зниженні споживання енергії. Відзначено нові напрямки магнітно-імпульсної обробки металів, що передбачають перетворення природних сил відштовхування металу об'єкта, що обробляється, в сили магнітно-імпульсного тяжіння зі зменшенням робочих частот діючих полів. Істотне зниження робочих частот дозволяє як перейти від процесу відштовхування до тяжіння, а й перейти від роботи з феромагнітними металами до не феромагнітних. Наприклад, з'являється можливість тяжіння алюмінієвих заготовок. Наведено приклади використання індукційного нагрівання металевих заготовок у сучасній промисловості. Розглянуто різні пристрої, що застосовуються для даних операцій, які пропонуються на сучасному ринку, як вітчизняними, так і зарубіжними виробниками. Описано фізику тепловиділення Ленца-Джоуля, результатом якого є індукційне нагрівання провідників струмами Фуко у зовнішньому електромагнітному полі інструмента. Запропоновано схеми практичної реалізації попереднього індукційного нагріву при магнітно-імпульсній обробці металевих заготовок, що дозволяють використовувати як автономні пристрої для збудження вихрових струмів, так і стаціонарне підключення, з тією ж метою, від додаткового джерела електроенергії. Як результат роботи відзначається можливість підвищення коефіцієнта корисної дії за рахунок збільшення пластичності металу при нагріванні заготовки, а також можливі обмеження описаної технології, пов'язані зі збільшенням активного опору металів при підвищенні Ленца-Джоуля тепловиділення.

Ключові слова: листові метали; індукторні системи; магнітно-імпульсна обробка металів; індукційне нагрівання; електромагнітні процеси; попереднє індукційне нагрівання; пластичність металів

APPLICATION AND SCHEMES OF INDUCTION PRELIMINARY HEATING IN MAGNETIC-PULSE TREATMENT OF METALS

T. V. GAVRYLOVA, E. O. CHAPLYGIN*, S. O. SHINDERUK

Department of Physics, Kharkiv national automobile and highway university, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The features of the processes of magnetic-pulse processing of metals in traditional schemes of technological processes of modern industrial production are highlighted. The work is a brief description of the state, application, and also proposed induction pre-heating schemes in industrial magnetic-pulse processing of metals. A method for increasing the efficiency of performing specified production operations is considered. The use of preheating leads to a significant improvement in the quality of production operations while reducing energy consumption. New directions of magnetic-pulse processing of metals are noted, implying the transformation of the natural repulsive forces of the metal of the processed object into the forces of magnetic-pulse attraction with a decrease in the operating frequencies of the acting fields. A significant decrease in operating frequencies makes it possible not only to go from repulsion to attraction, but also to go from working with ferromagnetic metals to non-ferromagnetic ones. For example, it becomes possible to attract aluminum blanks. Examples of the use of induction heating of metal blanks in modern industry are given. Various devices used for these operations, offered on the modern market, by both domestic and foreign manufacturers, are considered. The physics of Lenz-Joule heat release is described, the result of which is the induction heating of conductors by Foucault currents in the external electromagnetic field of the instrument. Schemes are proposed for the practical implementation of preliminary induction heating during magnetic-pulse processing of metal blanks, allowing the use of both autonomous devices for exciting eddy currents and a stationary connection, for the same purpose, of an additional source of electricity. As a result of the work, the possibility of increasing the efficiency by increasing the plasticity of the metal when heating the workpiece, as well as possible limitations of the described technology associated with an increase in the active resistance of metals with an increase in the Lenz-Joule heat release is noted.

Keywords: sheet metals; inductor systems; magnetic pulse processing of metals; induction heating; electromagnetic processes; induction preheating; plasticity of metals

Вступ

На сучасному етапі розвитку науково-технічного прогресу все більшого розвитку та застосування отримують прогресивні обробні

технології, засновані на використанні енергії електромагнітних полів. До пристроїв такого типу без перебільшення можна віднести установки силового впливу на оброблювані об'єкти (магнітний тиск), технічні системи нагріву об'єктів, що проводять

індукованими струмами, пристрої, де різного роду хімічні реакції ініціюються електричними полями та ін.

З погляду практичної значущості особливо виділяються технології безконтактної обробки провідних об'єктів силами магнітного тиску та створенням різних температурних режимів за рахунок індукційних ефектів. Умовно, способи силового впливу імпульсних електромагнітних полів на масивні об'єкти, що добре проводять, відносять до, так званої, традиційної магнітно-імпульсної обробки металів. Тут досягнуто певних успіхів у здійсненні таких виробничих операцій як плоске штампування, обтиск провідних труб, їх роздача і, нарешті, зварювання різнорідних металів. Остання операція є надзвичайно актуальною для сучасного промислового виробництва. Її здійснення вимагало створення умов, за яких досягаються досить високі швидкості зіткнення об'єктів, що зварюються. Має місце взаємне проникнення їх металів і, відповідно, утворення практично однорідного проміжного прикордонного шару, що забезпечує міцність з'єднання, що зварюється [1].

Останнім часом відзначається різке зростання інтересу до індукційного нагрівання в різних сферах людської діяльності. Особливо виділяються побутові потреби, і навіть різні ремонтні технології. Тут з успіхом розробляються виробничі операції з очищення лакофарбових покриттів, роз'єму болтових з'єднань, розм'якшення корпусних елементів металевих покриттів для відновлення пошкоджених поверхонь та ін. Ідею використання попереднього індукційного нагрівання в магнітно-імпульсній обробці металів було запропоновано Білим І. В., Горкіним Л. Д., Хименко Л. Т. ще 1984 г. Авторами пропозиції була розроблена і створена система, що ініціює протікання струму в обмотці робочого інструменту до моменту силового впливу. Оброблювані об'єкти [2].

Мета роботи

Метою роботи є коротке висвітлення стану та застосування, а також пропозиція схем попереднього індукційного нагріву в сучасній магнітно-імпульсній обробці металів як способу підвищення ефективності здійснення заданих виробничих операцій, що проявляється у підвищенні якості їх виконання при зниженні необхідних енерговитрат.

Фізична сутність процесів, що протікають

В основі технологій обробки металів з використанням енергії імпульсних електромагнітних полів лежить явище їхньої природної силової взаємодії з провідними середовищами. Практично, ці технології реалізуються за допомогою так званих індукторних систем, що являють собою сукупність власне індуктора-інструменту (як правило, плоского або циліндричного соленоїда) та об'єкта, що підлягає

силовому впливу. Слід наголосити на особливості роботи таких систем. Вона полягає в тому, що магнітний тиск здійснюється не будь-яким зовнішнім інструментом (наприклад, різцем у механічних способах), а є результатом взаємного відштовхування поля індуктора та поля струмів, індукованих у металі об'єкта, що обробляється. У спеціальній літературі також обґрунтовується фізика, згідно з якою за законом Ампера відштовхування обумовлено силовою взаємодією протилежно спрямованих збуджуючого струму індуктора і струму, що збуджується у об'єкті, що проводить.

Опускаючи деталі принципової дієвості, можна вважати, що результатом взаємодії поля індуктора з провідником є збудження, так званих, сил Лоренца, фізичною сутністю яких є взаємодія електромагнітного поля з електричним зарядом, що рухається [3].

Повертаючись до конкретики польових технологій у промисловості, можна зазначити, що ці практично успішні досягнення магнітно-імпульсної обробки металів (МІОМ) відносяться переважно до традиційних реалізацій у період до 1980 р. Не повторюючись у сказаному вище, можна відзначити і сучасні роботи з удосконалення традиційних методів збудження сил магнітного тиску та їх впровадження в роботу автоматизованих ліній промислових виробництв авто- і літакобудування [1,4,5].

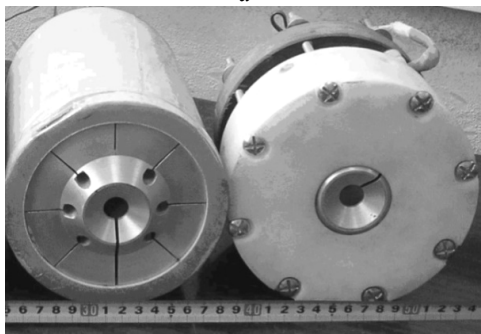
Нові можливі напрями розвитку магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металів з відповідним фізичним обґрунтуванням кожного з них були представлені авторами публікацій [6–12]. Приклад такого обладнання наведено на рис. 1. Перше передбачає створення певного просторово-часового розподілу напруженості збуджуваного поля за товщиною об'єкта, що підлягає обробці. У цьому випадку нівелюється ослаблення сил магнітного тиску, що обумовлене ефектами проникнення діючих полів [6]. Друге можливе напрям полягає у трансформації природного відштовхування силами Лоренца в тяжіння рахунок зниження робочих частот діючих полів. Даного рішення виявляється достатньо для обробки феромагнетиків. Що стосується не феромагнетиків, то їх тяжіння здійснюється за рахунок введення в індукторну систему додаткового провідного елемента у вигляді плоского екрану. Принцип дії таких інструментів ґрунтується на збудженні протилежно спрямованих індукованих струмів в екрані та об'єкті обробки. Відповідно до закону Ампера у таких системах матиме місце їхнє взаємне тяжіння [7].

Третій можливий напрямок пропонує трансформацію відштовхування в тяжіння за допомогою двочастотних (НЧ та ВЧ) індукторних систем. За задумом високочастотні поля нівелюють відштовхування, низькочастотні – тяжіння [6,8]. Нарешті, останній можливий напрямок отримав назву «методу прямого пропускання струму». Його сутність полягає у наступному. Основний струмопровід індуктора електрично з'єднується з ділянкою металу,

що підлягає деформуванню, так, що провідники з'єднуються паралельні, а струми, що протікають по них, односпрямовані. Відповідно до закону Ампера ці провідники відчуватимуть тяжіння [9–13].



а



б

Рис. 1 – Типове обладнання для магнітно-імпульсних технологій обробки металів тиском, а – магнітно-імпульсна установка МІУ – джерело потужності 2,4 кДж; б – індуктори – інструменти силового тяжіння ферромагнетиків

Загальним фактором причинності успіху виробничої операції, що виконується, незалежно від способу магнітно-імпульсного силового впливу ϵ , в першу чергу, пластичність металу заданої ділянки оброблюваного об'єкта [2,3]. З феноменологічних міркувань, достовірність яких обґрунтована розрахунками та експериментами у роботах різних авторів, очевидно, що підвищення пластичності можливе за допомогою індукційного нагрівання струмами Фуко [14]. Специфіка зазначеного фізичного ефекту полягає у неоднорідному розподілі індуктованих струмів за товщиною провідника. Проникнення магнітного поля призводить до їх витіснення в поверхневий шар (скін-шар), у результаті щільність вихрових струмів різко зростає, і цей шар металу інтенсивно розігрівається в першу чергу. Нижчезрештовані шари також прогріваються, але вже за рахунок теплопровідності. Як показали

дослідження, у скін-шарі виділяється $\sim 86,4\%$ від загальної кількості Ленц-Джоулевої теплоти. Крім того, величина скін-шару, а відповідно і нагрівання, також залежить від відносної магнітної проникності металу об'єкта, що обробляється [14,15].

Розвитку теорії індукційного нагріву присвячено досить багато наукових публікацій. Не зупиняючись на їх докладному перерахуванні та коментарях отриманих результатів, як приклад напрямів досліджень, наведемо характерні роботи, де йдеться про вплив струморозподілу на інтегральну ефективність тепловиділення не тільки в металі об'єкта, що обробляється, але і в обмотці збуджувача соленоїда [16,17]. Так, авторами [16] розраховано індукційне нагрівання провідника у внутрішній порожнині циліндричного соленоїда. Показано особливості, що відрізняють досліджувані процеси у випадках плоскої та криволінійної геометрії. Відзначено їхню обумовленість проникненням збуджуваних магнітних полів.

Робота [17] присвячена теоретичному дослідженню процесів аж до плавлення провідних заготовок з урахуванням розподілу щільності струму у витках індуктора-інструменту височастотного індукційного нагріву.

З практичної точки зору цікаві останні пропозиції вчених Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ) щодо підвищення інтенсивності Ленц-Джоулевого тепловиділення в металі об'єкта обробки [18,19]. Авторами [18] теоретично та експериментально обґрунтовано доцільність введення ферромагнетиків у конструкції індукторних систем. Показано, що за наявності феритового заповнення має місце суттєве зростання амплітуд збуджуваних струмів та можливе збільшення інтенсивності індукційного процесу більш ніж у $\sim 1,5$ рази. На спосіб обробки листових металів концентрованими джерелами енергії магнітних полів із попереднім індукційним нагріванням отримано патент України [19].

Слід зазначити, що останнім часом відзначається різке зростання інтересу до індукційного нагрівання в технологіях ремонту транспортних засобів. Тут з успіхом розробляються виробничі операції зі знімання стекл, очищення лакофарбових покриттів, роз'єму болтових з'єднань, розм'якшення металевих покриттів кузовів перед рихтуванням вм'ятин та ін [20–22]. Ілюстрації відповідного типового обладнання, розробленого в ХНАДУ та інженерами концерну ВЕТАГ (Швейцарія) представлені нижче на рис. 2.

Попереднє індукційне нагрівання в МІОМ

Принципові схеми застосування індукційного нагріву листових металів у магнітно-імпульсних технологіях представлені на рис. 3.

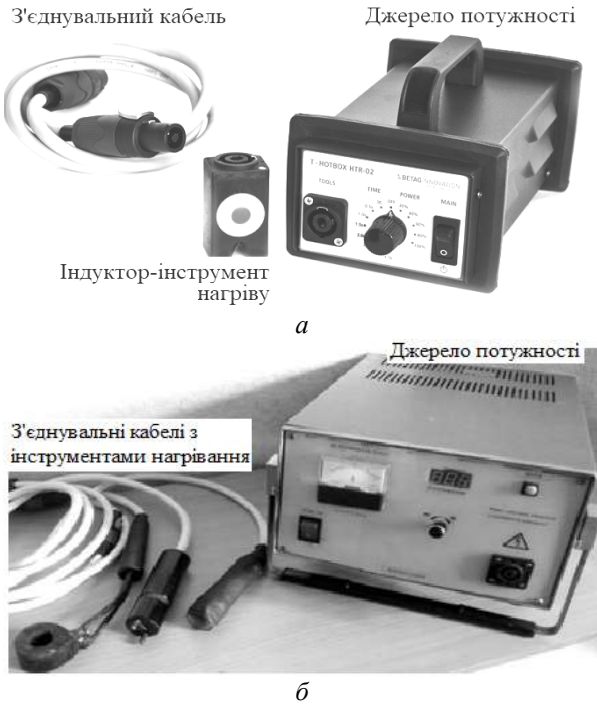


Рис. 2 – Типове обладнання для локального індукційного нагріву в технологіях ремонту транспортних засобів, а – розробка ХНАДУ (Україна); б – розробка ВЕТАГ (Швейцарія)

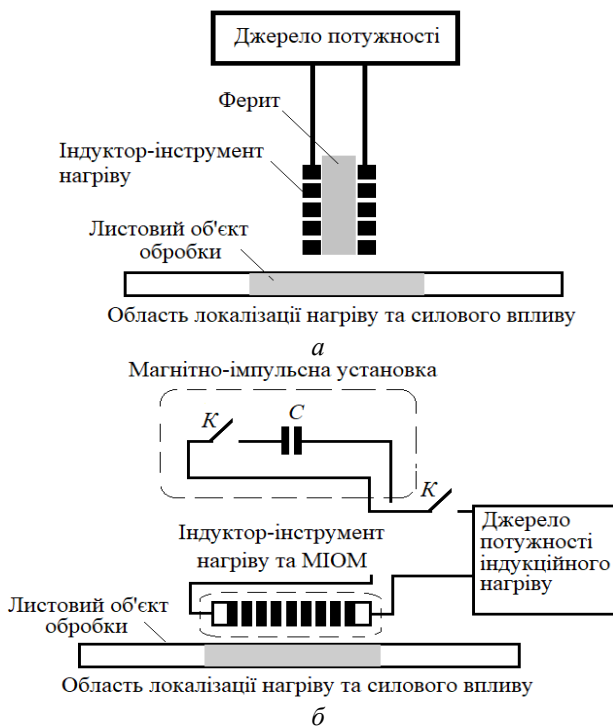


Рис. 3 – Схеми МІОМ з попереднім індукційним нагріванням об'єкта обробки при використанні виносного індуктора-інструменту МІОМ, а – автономна система індукційного нагріву; б – система індукційного нагріву із підключенням до обмотки індуктора-інструменту МІОМ

Рис. 3, а показано застосування будь-якої автономної системи індукційного нагріву (наприклад, рис. 2). Алгоритм реалізації виробничої операції передбачає початкове розміщення в галузі обробки індуктора-інструменту індукційного нагріву і власне нагрівання до так званих кольорів втечі. Після чого живлення системи відключається, а індуктор-інструмент індукційного нагріву забирається. На його місце міститься виносний індуктор-інструмент магнітно-імпульсного силового впливу [23]. Вмикання струму від МІУ збуджує сильне магнітне поле у робочій зоні інструменту. Його вплив деформує задану область листового об'єкта, що обробляється, пластичність якої підвищена попереднім нагріванням.

Істотною перевагою цієї схеми є можливість застосування індукторів з феритовими вставками, що істотно підвищують інтенсивність Ленц-Джоулевого тепловиділення.

Рис. 3, б показана схема, де джерело сигналу для індукційного нагріву підключається безпосередньо до обмотування індуктора-інструменту МІОМ. Алгоритм реалізації виробничої операції передбачає початкове включення джерела потужності попереднього індукційного нагріву заданої області силового впливу. Після цього це джерело потужності відключається. Підключається струм від магнітно-імпульсної установки. Пондеромоторні сили, що збуджуються, деформують задану область об'єкта обробки. Загальний вигляд інструменту МІОМ з можливим підключенням попереднього індукційного нагрівання листового об'єкта обробки представлено на рис. 4.



Рис. 4 – Загальний вигляд інструменту МІОМ з можливим підключенням попереднього індукційного нагрівання листового об'єкта обробки

Слід зазначити, що у цій схемі неможливе включення феритових вставок у конструкції індукторів-інструментів МІОМ. Крім того, виникають проблеми у відповідності до активно-індуктивного навантаження (власне індуктор) і схеми джерела потужності для індукційного нагріву.

Висновки

Коротко висвітлено стан та застосування індукційного нагріву в сучасній магнітно-імпульсній

обробці металів, як способу підвищення якості її виконання.

Запропоновано схеми практичної реалізації попереднього індукційного нагріву, що дозволяють використання як автономних пристроїв для збудження вихрових струмів, так і стаціонарне підключення з метою додаткового джерела електричної потужності.

Відзначено можливість підвищення ефективності рахунок збільшення пластичності металу при нагріванні, і навіть вказані можливі її обмеження, пов'язані зі зростанням активного опору металів у разі зростання Ленц-Джоулевого тепловиділення.

Список літератури

1. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A. E. & Kleiner M. Electromagnetic Forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. 211. P. 787–829. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012.
2. Белый И. В., Горкин Л. Д., Хименко Л. Т. Деформирование металлов импульсным электромагнитным полем с предварительным индукционным нагревом заготовок. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1984. №7. С. 6–8.
3. Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хименко Л. Т. *Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Издание второе, переработанное и дополненное. Под общей редакцией д.т.н., проф. Батыгина Ю.В.* Харьков: Изд. МОСТ – Торнадо, 2003. 284 с.
4. Batygin Yu. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V., Chaplygin E. A. Pulsed Electromagnetic Attraction Processes for Sheet Metal Components. *6th International Conference on High Speed Forming (27–29 March 2014)*. Daejeon, Korea. P. 253-260. doi: 10.17877/DE290R-945.
5. Decat G., Deckx L., Meynen G., De Graef E. & Jonlet F. Magnetic Fields of Induction Heaters in the Framework of Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2015. 12:2. P. 169-176. doi: 10.1080/10803548.2006.11076678.
6. Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хименко Л. Т. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов. *Электротехника и электромеханика*. 2004. № 2. С. 80–84.
7. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. *Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies*. Springer International Publishing AG. 2018. 99 p.
8. Batygin Yu. V., Chaplygin E. A., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. *Electrical Engineering & Electrical Mechanics*. 2018. №3. P. 43–52. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.10.
9. Batygin Yu. V., Yeryomina O. F., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A., Chaplygin E. O. Magnetic-pulsed attraction of sheet billets with “direct passage of current”. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Нові рішення в сучасних технологіях. 2020. 4(6). P. 3–13. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.01.
10. Batygin Yu. V., Chaplygin E. A., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A. Numerical estimates of currents and forces in linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 1: low electrical conductance metals. *Electrical Engineering & Electrical Mechanics*. 2019. №5. P. 40–44. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.07.
11. Ouyang Sh., Li Ch., Du L., Li X., Lai Zh., Peng T., Han X., Cao Q., Li L. Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet metal utilizing a low-frequency discharge: A new method for attractive forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. no. 291. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.117001.
12. Bay F. Jeanson A-C., Zapata J. Electromagnetic forming processes: material behaviour and computational modelling. *Procedia Engineering*. 2014. no. 81. P. 793-800. doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.078.
13. Batygin Yu. V., Chaplygin E. A., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A. Numerical estimates of currents and forces in a linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 2: High specific electrical conductivity metals. *Electrical Engineering & Electrical Mechanics*. 2019. №6. P. 39–43. doi: 10.20998/2074-272X.2019.6.05.
14. Batygin Yu. V., Sabokar O. S., Strelnikova V. A. Induction heating. History and development. Application in modern transport repairing technologies. *Автомобільний транспорт*. 2017. Вип. 40. С. 75–79.
15. Батигін Ю. В., Сабокар О. С., Стрельнікова В. А. Індукційний нагрів тонкої феромагнітної пластини в полі плоского кругового соленоїда. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. Вип. 6. С. 135–140.
16. Батыгин Ю. В., Чаплыгин Е. А., Сабокар О. С., Стрельникова В. А. Индукционный нагрев во внутренней полости цилиндрического соленоида. Основные соотношения протекающих процессов. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2017. Вип. 6. С. 32–36.
17. Щерба А. А., Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Исследование процессов высокочастотного индукционного нагрева и плавления проводящих заготовок с учетом распределения плотности тока в витках индуктора. *Праці ІЕД НАНУ*. 2015. 41. С.132-139.
18. Стрельнікова В. А. Особенности индукционного нагрева массивных металлических заготовок индукторами с ферромагнитными сердечниками. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. 2018. № 32 (1308). С. 99–104. doi: 10.20998/2079-3944.2018.32.17.
19. Батигін Ю. В., Чаплыгин Е. О., Сабокар О. С., Стрельнікова В. А. Спосіб обробки листових металів концентрованими джерелами енергії магнітних полів з попереднім нагрівом. Патент України № 121597, 2017.
20. Стрельнікова В. А. Сучасні технології ремонту автомобілів з використанням електромагнітної формовки металів. *Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика. Тези доповідей III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, спеціалістів та аспірантів. (11-12 травня 2017 р., м. Маріуполь)*. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2017. С. 70–72.
21. Батыгин Ю. В., Стрельникова В. А. *Индукционный нагрев и магнитно-импульсное притяжение для промышленных технологий современности: монография*. Харьков: Лидер, 2019. 162 с.
22. BETAG Innovation URL: <https://www.betaginnovation.com/medium-panel-repair/> (дата звернення 15.11.2021).
23. Батыгин Ю. В., Горкин Л. Д., Горкин А. Л., Лысенко И.

М. Магнитно-импульсная установка с выносным индуктором. № 8480, 1989.

24. Beneson W., Harris J. W., Stoker H., Lutz H. *Handbook of Physics. 1 st ed. 2002. Corr. 2nd printing 2006*. Berlin: Springer, 2006. 1186 p.

References (transliterated)

1. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A. E. & Kleiner M. Electromagnetic Forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211, pp.787–829, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012.
2. Belyj I. V., Gorkin L. D., Himenko L. T. Deformirovanie metallov impul'snym jelektronnym polem s predvaritel'nym indukcionnym nagrevom zagotovok. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 1984, 7, pp. 6-8.
3. Batygin Ju. V., Lavinskij V. I., Himenko L. T. *Impul'snye magnitnye polja dlja progressivnyh tehnologij. Tom 1. Izdanie vtoroe, pererabotannoe i dopolnennoe. Pod obshhej redakciej d.t.n., prof. Batygina Ju.V.* Har'kov. Izd. MOST – Tornado, 2003. 284 s.
4. Batygin Yu. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V., Chaplygin E. A. Pulsed Electromagnetic Attraction Processes for Sheet Metal Components. *6th International Conference on High Speed Forming (27–29 March 2014)*. Daejeon, Korea, p. 253-260, doi: 10.17877/DE290R-945.
5. Decat G., Deckx L., Meynen G., De Graef E. & Jonlet F. Magnetic Fields of Induction Heaters in the Framework of Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2015, 12:2, pp. 169-176, doi: 10.1080/10803548.2006.11076678.
6. Batygin Ju. V., Lavinskij V. I., Himenko L. T. Fizicheskie osnovy vozmozhnyh napravlenij razvitiya magnitno-impul'snoj obrabotki tonkostennyh metallov. *Jeletrotehnika i jeletromehanika*, 2004, 2, pp. 80–84.
7. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. *Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies*. Springer International Publishing AG. 2018. 99 p.
8. Batygin Yu. V., Chaplygin E. A., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. *Electrical Engineering & Electrical Mechanics*, 2018, 3, pp. 43–52, doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.10.
9. Batygin Yu. V., Yeryomina O. F., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A., Chaplygin E. O. Magnetic-pulsed attraction of sheet billets with “direct passage of current”. *Вісник НТУ «ХПІ». Нові рішення в сучасних технологіях*, 2020, 4(6), pp. 3–13, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.01.
10. Batygin Yu. V., Chaplygin E. A., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A. Numerical estimates of currents and forces in linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 1: low electrical conductance metals. *Electrical Engineering & Electrical Mechanics*, 2019, 5, pp. 40–44, doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.07.
11. Ouyang Sh., Li Ch., Du L., Li X., Lai Zh., Peng T., Han X., Cao Q., Li L. Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet metal utilizing a low-frequency discharge: A new method for attractive forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, no. 291, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.117001.
12. Bay F. Jeanson A-C., Zapata J. Electromagnetic forming processes: material behaviour and computational modelling. *Procedia Engineering*, 2014, no. 81, pp. 793-800, doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.078.
13. Batygin Yu. V., Chaplygin E. A., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A. Numerical estimates of currents and forces in a linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 2: High specific electrical conductivity metals. *Electrical Engineering & Electrical Mechanics*, 2019, 6, pp. 39–43, doi: 10.20998/2074-272X.2019.6.05.
14. Batygin Yu. V., Sabokar O. S., Strelnikova V. A. Induction heating. History and development. Application in modern transport repairing technologies. *Автомобільний транспорт*, 2017, Вип. 40, С. 75–79.
15. Batygin Ju. V., Sabokar O. S., Strelnikova V. A. Indukcionnij nagrив tonkoї feromagnitnoї plastini v poli ploskogo krugovogo solenoїda. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2017, Вип. 6, pp. 135–140.
16. Batygin Ju. V., Chaplygin E. A., Sabokar O. S. Strelnikova V. A. Indukcionnyj nagrev vo vnutrennej polosti cilindricheskogo solenoїda. Osnovnye sootnosheniya protekajushhijh processov. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2017, Вип. 6, pp. 32–36.
17. Shherba A. A., Podol'cev A. D., Kucherjavaja I. N. Issledovanie processov vysokochastotnogo indukcionnogo nagreva i plavlenija provodjashhijh zagotovok s uchedom raspredelenija plotnosti toka v vitkah induktora. *Praci IED NANU*, 2015, 41, pp. 132–139.
18. Strelnikova V. A. Osobennosti indukcionnogo nagreva massivnyh metallicheskih zagotovok induktorami s feromagnitnymi serdechnikami. *Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратури*, 2018, 32 (1308), pp. 99–104, doi: 10.20998/2079-3944.2018.32.17.
19. Batygin Ju. V., Chaplygin E. O., Sabokar O. S., Strelnikova V. A. Sposib obrobki listovih metaliv koncentrovanimi dzherelami energii magnitnih poliv z poperednim nagrивom. Patent Ukraїni № 121597, 2017.
20. Strelnikova V. A. Suchasni tehnologii remontu avtomobiliv z vikoristannjam jelektronnogo formovki metaliv. *Problemi energoresursozbezhehennja v promislovomu regioni. Nauka i praktika. Tezi dopovidej III Vseukraїns'koї naukovo-praktichnoї konferencii molodih vchenih, specialistiv ta aspirantiv. (11-12 travnja 2017 r., m. Mariupol')*. Mariupol'. DVNZ «PDTU», 2017. P. 70–72.
21. Batygin Ju. V., Strelnikova V. A. *Indukcionnyj nagrev i magnitno-impul'snoe pritjazhenie dlja promyshlennyh tehnologij sovremennosti: monografija*. Har'kov. Lider, 2019. 162 s.
22. BETAG Innovation. Available at: <https://www.betaginnovation.com/medium-panel-repair/> (accessed 15.11.2021).
23. Batygin Ju. V., Gorkin L. D., Gorkin A. L., Lysenko I. M. *Magnitno-impul'snaja ustanovka s vynosnym induktorom*. № 8480, 1989.
24. Beneson W., Harris J. W., Stoker H., Lutz H. *Handbook of Physics. 1 st ed. 2002. Corr. 2nd printing 2006*. Berlin: Springer, 2006. 1186 p.

Відомості про авторів (About authors)

Гаврилова Тетяна Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-3677-2219; e-mail: gavrilova.tatyana@i.ua.

Gavrylova Tetiana – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3677-2219; e-mail: gavrilova.tatyana@i.ua.

Чапльгін Євген Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2968-4800; e-mail: chaplygin_e_a@gmail.com.

Chaplygin Evgen – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2968-4800; e-mail: chaplygin_e_a@gmail.com.

Шиндерук Світлана Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6354-4174; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

Shinderuk Svitlana – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6354-4174; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Гаврилова Т. В., Чапльгін Є. О., Шиндерук С. О. Застосування та схеми попереднього індукційного нагріву у магнітно-імпульсній обробці металів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 17-23. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.03.

Please cite this article as:

Gavrylova T., Chaplygin E., Shinderuk S. Application and schemes of induction preliminary heating in magnetic-pulse treatment of metals. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4 (10), pp. 17-23, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.03.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Гаврилова Т. В., Чапльгін Е. А., Шиндерук С. О. Применение и схемы предварительного индукционного нагрева в магнитно-импульсной обработке металлов. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 17-23. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.03.

АННОТАЦІЯ Виделены особенности процессов магнитно-импульсной обработки металлов в традиционных схемах технологических процессов современного промышленного производства. Работа представляет собой краткое описание состояния, применения, а также предложены схемы предварительного индукционного нагрева в промышленной магнитно-импульсной обработке металлов. Рассмотрен способ повышения эффективности выполнения заданных производственных операций. Использование предварительного нагрева приводит к существенному повышению качества выполнения производственных операций при снижении энергопотребления. Отмечены новые направления магнитно-импульсной обработки металлов, предполагающие преобразование естественных сил отталкивания металла обрабатываемого объекта в силы магнитно-импульсного притяжения с уменьшением рабочих частот действующих полей. Существенное понижение рабочих частот позволяет не только перейти от процесса отталкивания к притяжению, но и перейти от работы с ферромагнитными металлами к не ферромагнитным. Например, появляется возможность притяжения алюминиевых заготовок. Приведены примеры использования индукционного нагрева металлических заготовок в современной промышленности. Рассмотрены различные устройства, применяемые для данных операций, предлагаемые на современном рынке, как отечественными, так и зарубежными производителями. Описана физика тепловыделения Ленца-Джоуля, результатом которого является индукционный нагрев проводников токами Фуко во внешнем электромагнитном поле инструмента. Предложены схемы практической реализации предварительного индукционного нагрева при магнитно-импульсной обработке металлических заготовок, позволяющие использовать, как автономные устройства для возбуждения вихревых токов, так и стационарное подключение, с той же целью, дополнительного источника электроэнергии. В качестве результата работы отмечается возможность повышения коэффициента полезного действия за счет увеличения пластичности металла при нагреве заготовки, а также возможные ограничения описанной технологии, связанные с увеличением активного сопротивления металлов при повышении Ленц-Джоулева тепловыделения.

Ключевые слова: листовые металлы; индукторные системы; магнитно-импульсная обработка металлов; индукционный нагрев; электромагнитные процессы; предварительный индукционный нагрев; пластичность металлов.

Надійшла 20.11.2021

УДК 62-137-886.1

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.04

АНАЛІЗ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО ШТИФТОВИХ КОНІЧНИХ З'ЄДНАНЬ У ВУЗЛАХ НАСОСІВ

I. М. ДЕГТЯРЬОВ^{1*}, А. О. НЕШТА¹, М. П. САМАРДАК², В. М. КОНОНОВИЧ¹, Я. В. КЛОК¹

¹ кафедра технології машинобудування, верстатів та інструментів, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА;

² ПАТ «Сумський завод «Насосенергомаш», Суми, УКРАЇНА;

*e-mail: ivan_dehtiarov@tmvi.sumdu.edu.ua

АНОТАЦІЯ У статті проаналізовано причини виникнення ситуації з появою похибок виготовлення та відсутності необхідних технічних вимог для виконання штифтовим конічним з'єднанням його службового призначення. Аналіз виконувався на основі геометричної побудови складального розмірного ланцюга із двох деталей, що підлягають з'єднанню та штифта конічного з конусністю 1:50 за ГОСТ 9465-79, що застосовується саме у штифтових з'єднаннях насосного обладнання. Геометричний аналіз включає у себе виокремлення відхилень на лінійні розміри та кутові відхилення. Значення кутових відхилень привели до лінійних значень їх проекцій вздовж осі штифта, для визначення допуску на висоту виступання торця штифта над поверхнею з'єднувальних деталей. Також теоретично доведено необґрунтованість призначення показника шорсткості отвору під штифт на рівні Ra 1,6 мкм та його недоцільність при неможливості забезпечення необхідної довжини контакту і запропоновано вирішення даного протиріччя. Виконано детальний аналіз технічних вимог креслень вузлів насосного обладнання, що містять штифтові конічні з'єднання, та пункти відповідних стандартів, що у результаті дозволило виділити невідповідності вимог та запропонувати рекомендації, виконання яких забезпечить отримання якісного з'єднання відповідно до його службового призначення. Аналіз геометричних параметрів штифтових конічних з'єднань вперше дозволив визначити залежність висоти виступання торця штифта над поверхнею з'єднувальних деталей та допуску на даний параметр, а також запропонувати математичні залежності для їх визначення. Представлені залежності можуть бути використані на практиці для обґрунтованого розрахунку під час проєктування штифтових конічних з'єднань у вузлах насосів та на машинобудівних підприємствах, де використовуються подібні з'єднання. Вперше представлено та обґрунтовано визначення величини допуску на розмір отвору під оброблення розгортками конічними, а також запропонована формула розрахунку даного параметра, що наведено у рекомендаціях для можливості їх застосування на підприємствах машинобудівного комплексу та у виробках, які містять у конструкції штифтові конічні з'єднання.

Ключові слова: насособудування; точність оброблення; технологічний процес; конструкторська документація; конусність 1:50; величина натягу

ANALYSIS OF GEOMETRIC PARAMETERS AND TECHNICAL REQUIREMENTS FOR PIN CONICAL JOINTS IN PUMP NODES

I. DEHTIAROV^{1*}, A. NESHTA¹, M. SAMARDAK², V. KONONOVYCH¹, Y. KLOK¹

¹ Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University, Sumy, UKRAINE

² PAT «Sumy plant «Nasosenergomash» Sumy, UKRAINE

ABSTRACT The article analyzes the causes of the situation with the appearance of manufacturing errors and the lack of the necessary technical requirements to perform a pin conical joint his intended purpose. The analysis was performed based on geometric construction of the assembly dimensional chain of two parts to be connected and a conical pin with a taper 1:50 according to GOST 9465-79, which is used in the pin joints of pumping equipment. The geometric analysis included the separation of deviations into linear dimensions and angular deviations. The values of the angular deviations were reduced to the linear values of their projections along the axis of the pin, to determine the tolerance on the end height protrusion of the pin above the surface of the connecting parts. Also, the unfoundedness of assigning the roughness index of the hole under the pin at the level of Ra 1.6 μm and its inexpediency when it is impossible to ensure the required contact length is theoretically proved and the solution of this contradiction is proposed. A detailed analysis of the technical requirements for drawings of pumping equipment units containing pin conical joints and paragraphs of the relevant standards, which resulted in the inconsistencies, and offer recommendations that will ensure the quality of the joint following its official purpose. Analysis of the geometric parameters of pin conical joints for the first time allowed to determine the dependence of the height of the pin end protrusion above the surface of the connecting parts and the tolerance for this parameter, as well as to propose mathematical dependences for their determination. The presented dependencies can be used in practice for a reasonable calculation during the design of pin conical joints in pump nodes and in machine-building enterprises where such joints are used. For the first time, the determination of the tolerance for hole size for machining conical reamers is

presented, and the formula for calculating this parameter is proposed, which is given in the recommendations for their use in machine building enterprises and products containing pin conical joints.

Keywords: pump production; machining accuracy; manufacturing process; design documentation; taper 1:50; amount of tightness

Вступ

Штифтові конічні з'єднання (ШКЗ), як вже згадувалось у попередніх публікаціях [1] отримали широке застосування у конструкціях різних вузлів насосного обладнання, завдяки простоті обслуговування та високій точності взаємного розміщення сполучних деталей при повторних складаннях. Можливості повторного складання деталей з високою точністю їх взаємного розміщення, що впливає на характеристики вузла, машини та агрегату в цілому, є ключовим фактором вибору саме ШКЗ з конусністю 1:50.

При цьому, у зв'язку з постійно зростаючою конкуренцією в області насособудування, важливість забезпечення експлуатаційної технологічності конструкції для замовника продукції мають виходити на перший план та забезпечуватися виробником. Переваги ШКЗ над штифтовими циліндричними з'єднаннями також детально описані у [1].

Найбільш розповсюдженим місцем, де використовуються ШКЗ, є з'єднання кришки та корпусу відцентрового насоса горизонтального компонування, на прикладі якого і буде розглядатися матеріал у даній роботі. Але ШКЗ також застосовується і в конструкціях інших насосів і агрегатів за тими ж принципами та функціями, що воно виконує [2].

Принцип з'єднання кришки та корпусу відцентрового насоса, що застосовується зараз на підприємствах, та містить ШКЗ використовується вже більше 50-ти років. Адже відтоді і до наших днів конструкції відцентрових насосів принципово майже не змінилися. Відмінності полягають лише у використанні нових матеріалів та підвищенні технічних характеристик агрегату [3]. Але застосування ШКЗ в насосах з 70-х років минулого сторіччя і до нашого часу говорить про його ефективність та практичну надійність. Саме ШКЗ застосовується вже більше 100 років у машинобудівній та інших галузях промисловості. Виняткова важливість ШКЗ, особливо для машинобудівної галузі, виражається в тому, що першим стандартом, опублікованим Німецьким інститутом стандартизації у 1917 році, став стандарт на виготовлення конічних штифтів – DIN 1 [4].

Але окрім штифта конічного у ШКЗ присутні ще і як мінімум дві з'єднувальні між собою деталі. Параметри ШКЗ, які необхідно вказувати на кресленні регламентуються ДСТУ ГОСТ 2.307:2013 (попередник ГОСТ 2.307-68) та ГОСТ 2.320-82, але дані стандарти з'явилися набагато пізніше, ніж почали використовувати ШКЗ. Цей факт спричинив ситуацію коли робітники на робочих місцях не маючи необхідних вимог до ШКЗ на кресленні виконували

його спираючись виключно на свій практичний досвід. Проте навіть з появою відповідних стандартів на ШКЗ технічні вимоги на кресленнях все ще не містять відповідної інформації, орієнтованої саме на вказання параметрів ШКЗ, що визначають та дозволяють реалізувати його службове призначення у повній мірі. У результаті через відсутність необхідної інформації на робочих та складальних кресленнях деталей, що містять ШКЗ [1], а також через досить великі допуски на його параметри, під час виготовлення на підприємствах брак саме у ШКЗ виникає досить часто. Це унеможливило виконання ШКЗ свого службового призначення, а саме приведення базових поверхонь первинне положення після демонтажу деталей з'єднання. Тому проблему недостатньої інформації у технічних вимогах до ШКЗ саме на основі його геометричних параметрів необхідно вирішувати.

Із огляду публікацій вітчизняних і закордонних вчених, та інших літературних джерел виявлено, що питанням проєктування та аналізу штифтових з'єднань займалися багато світових вчених. Зокрема, питанням забезпечення натягу у штифтовому з'єднанні у роботі [5] займався М. Obeidi, де для підвищення коефіцієнту зачеплення штифта зі з'єднувальними деталями застосовується новий метод лазерного текстурування, на прикладі штифтів із корозійностійкої сталі. Робота [6] присвячена дослідженню сили запресовування штифта в залежності від довжини посадки на прикладі з'єднання штифта з пружною вилкою спеціальної конструкції. Y. Sun та інші у [7] досліджували вплив отримання остаточного розміру отвору під штифт на розвиток стомлюючих тріщин у з'єднанні. Аналізувались два варіанти отримання остаточного розміру отвору під штифт методом пластичного деформування в холодному стані або отримання розміру отвору безпосередньо при запресовуванні штифта. Робота [8] шляхом результатів скінчено елементного моделювання дає уявлення про процеси мікроекструзії конічних штифтів при різних режимах запресовування, що дає змогу визначити оптимальну силу запресовування в залежності від параметрів потоку матеріалу. Дослідження штифтових з'єднань опосередковано представлені в [9], де шляхом чисельного моделювання з'єднань елементів рами у програмних комплексах STAAD та ANSYS 2020R2 у тому числі визначались напруження в штифтах під час навантаження елементів рами. Широко застосовуються штифтові з'єднання і в композитних конструкціях, що описано у роботі [10], де вчені досліджували вплив укладки волокон композиційного матеріалу навколо штифтів на жорсткість та показники міцності з'єднання. S. Lee та інші у [11] дослідили працездатність квадруплексних модулів

напружень з використанням нових конструкцій штифтових з'єднань. При цьому контроль навантаження здійснюється із використанням генетичного алгоритму щільності сили. Робота [12] присвячена експериментальним дослідженням штифтових з'єднань з використанням конічних штифтів з конусністю 1:50 в алюмінієвих фермах рознімної конструкції. Виконувались дослідження на поздовжній зріз штифта при осьовому зусиллі та при передачі крутного моменту.

Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що питання аналізу технічних вимог до ШКЗ та його геометричних параметрів, що впливають на дотримання вимог конструктора науковою спільнотою розглядалися досить обмежено. Досліджень у даному напрямку недостатньо для формулювання чітких науково обґрунтованих рекомендацій, щодо нанесення на креслення технічних вимог та параметрів ШКЗ, що відображали б чіткі та однозначні вимоги розробника для можливості їх реалізації у технологічному процесі та отримання якісних виробів без браку в ШКЗ.

Мета роботи

Виявлення недоліків у технічних вимогах до штифтових конічних з'єднань та на основі геометричного аналізу розроблення рекомендацій щодо внесення змін до складальних креслень із застосуванням конічних штифтів під час проектування вузлів насосів.

Виклад основного матеріалу

Аналіз переваг та недоліків ШКЗ вже виконаний у [14] з якого встановлено, що у порівнянні зі штифтовими циліндричними з'єднаннями, ШКЗ більш технологічні з точки зору подальшої експлуатації, що є важливим для замовника насосної продукції у перспективі обслуговування.

Тому більш детально проаналізуємо варіант ШКЗ із використанням штифта за ГОСТ 9465-79 (рис. 1) [1] у тому вигляді, як воно показано у стандарті підприємства (СТП) АТ «Сумський завод «Насосенергомаш», що використовується на даний момент. Даний СТП розроблений на ПАТ «ВНДІАЕН» ще в 90-і роки ХХ-го століття під потреби підприємства та не переглядався до сих пір з точки зору інформації про дане з'єднання, яку ми маємо на даний момент [13,14], а саме:

- на кресленні відсутня інформація про необхідну величину натягу в ШКЗ при тому, що воно може виконувати свої функції тільки як з'єднання з натягом;

- креслення ШКЗ містить нелогічні вимоги забезпечення вильоту торця штифта над поверхнею кришки із ще більш нелогічним допуском на цей параметр $h \pm 2$ мм згідно СТП підприємства;

- введення до складу виробу гайки, яка необхідна тільки для демонтажу, що створює ще більше проблем на етапі складання;

- вимога шорсткості поверхні конічного отвору під штифт - Ra 1,6 мкм не дозволяє використовувати розгортки конічні 1:50 за ГОСТ 10081-84 і ГОСТ 11177-84. Так як згідно з технічними умовами по ГОСТ 10083-81 на виготовлення розгорток вони гарантують отримання шорсткості не більше Rz 12,5 мкм, що відповідає Ra 3,2 мкм відповідно до ГОСТ 2789-73;

- креслення ШКЗ, що наведене в СТП підприємства не обумовлює величини допуску на отвір, який свердлиться при сумісній обробці деталей для обробки конічної поверхні під конічну розгортку.

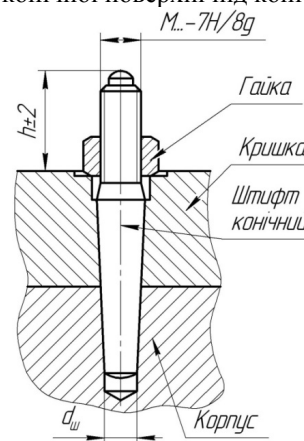


Рис. 1 – ШКЗ на основі штифта за ГОСТ 9465-79 на прикладі з'єднання кришки і корпусу з глухим отвором і гайкою для демонтажу (заводський варіант за СТП)

Розглянемо більш детально кожен з перерахованих вище проблем із вимогами до ШКЗ в існуючому їх варіанті на кресленнях.

ШКЗ може виконувати своє службове призначення виключно тільки як з'єднання з натягом [1]. Проте про відсутність інформації щодо величини натягу на кресленнях, що містять ШКЗ вже сказано в [13, 14]. З точки зору конструктора це обґрунтовувалося неможливістю її визначення та чіткого зазначення цього параметра в стандартах, і відсутність будь-яких інших рекомендацій із даного питання. Тому пропонується до вирішення даної проблеми підійти як з точки зору забезпечення необхідної довжини контакту конічних поверхонь штифта і деталей, що підлягають фіксації. Для цього у [1] було розглянуто стандартне місце під установку штифта конічного, та встановлено, що тип контакту в ШКЗ залежить лише від допустимих кутових відхилень кутів отвору під штифт та штифта. У [1] представлена у вигляді формули геометрична залежність величини відхилення кута отвору під штифт від допусків на параметри розгорток конічних за ГОСТ 10083-81. Також дослідження у [1] показали, що сумарна відносна похибка відхилення кутів отвору

та штифта в ШКЗ теоретично може досягати 38% в залежності від класу точності штифта.

За ГОСТ 2.320-82 згідно п. 3.3 конструктору пропонується задавати величину натягу через взаємне осьове переміщення сполучених конусів від їх початкового положення або згідно п. 3.4 за заданим зусиллям запресовування, що прикладається в початковому положенні сполучених конусів. При цьому задання натягу за осьовим переміщенням буде коректним лише у випадку проведення серії експериментальних досліджень величини натягу від осьового переміщення штифта для всіх діаметрів ШКЗ, що досить трудомістко і майже нереально у виробничих умовах. Також задання величини натягу за заданим зусиллям запресовування також має опосередкований суб'єктивний характер, адже даний метод може бути застосований лише при абсолютних співпадіннях кутів отвору та штифта в ШКЗ. При суттєвих відхиленнях кутів отвору та штифта даного зусилля може не вистачити для створення контакту вздовж усієї конічної поверхні, не кажучи вже про рівномірність натягу в ШКЗ. Отже задання натягу за заданим зусиллям запресовування також є не обґрунтованим.

Тому у якості вирішення проблеми для забезпечення на кресленні інформації, необхідної для якісного виготовлення та роботи ШКЗ, пропонується у якості рекомендацій конструктору вказувати саме величину натягу в ШКЗ. Дана величина має відповідати середній величині натягу, що виникає у штифтових циліндричних з'єднаннях при рекомендованих для них за ГОСТ 26862-86 посадках Н7/м6 та Н7/н6, та залежить від номінального діаметру ШКЗ. Посадка та відповідно величина натягу обирається конструктором в залежності від умов роботи з'єднання.

Вимога щодо забезпечення вильоту торця штифта над поверхнею кришки і допуск на цей параметр $h \pm 2$ мм згідно СТП підприємства є нелогічною, а в ГОСТ 2.307-2011 цього не вказано зовсім. Виліт торця штифта залежить від допусків на діаметр і кут отвору, а також діаметр і кут штифта, що варіюються в досить широких діапазонах [1], а також від допусків на лінійні розміри ШКЗ.

У насосному обладнанні при з'єднанні кришки і корпусу використовуються в основному штифти конічні за ГОСТ 9465-79, так як отвори під штифти глухі і для можливості обслуговування вузла цей вибір конструктора є оптимальним. Теоретично допускається використання в поєднанні також штифтів конічних за ГОСТ 9464-79, але це не виправдано економічно більш складним оснащенням для їх демонтажу, а також ризиком пошкодження різі при демонтажі і початковою істотно більшою вартістю самих штифтів. Тому для аналізу розміру вильоту торця штифта і допустимих відхилень цього розміру виконаний аналіз параметрів конструкції штифта конічного за ГОСТ 9465-79 (рис. 2) та ШКЗ у заводському варіанті СТП зі штифтом за ГОСТ 9465-79 (рис.3).

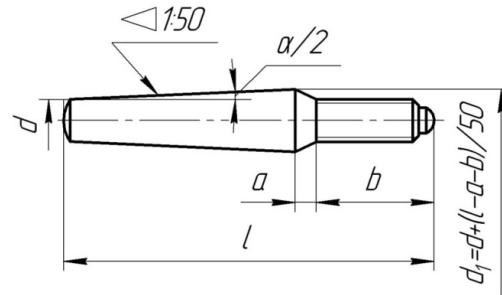


Рис. 2 – Ілюстрація параметрів штифта конічного за ГОСТ 9465-79

Таким чином, виходячи із вищевикладеної інформації, а також із рис. 3 виступання торця штифта h та його допуск Th в ШКЗ за ГОСТ 9465-79 над поверхнею кришки, залежать від:

- допуску на діаметр d штифта;
- допуску на діаметр D отвору під штифт;
- допуску на кут $\alpha_1/2$ штифта;
- допуску на кут $\alpha_2/2$ отвору під штифт;
- розміру довжини штифта l та допуску на нього для штифтів за ГОСТ 9465-79;
- розміру довжини паска a та допуску на нього для штифтів за ГОСТ 9465-79;
- розміру довжини різьової цапфи b та допуску на нього для штифтів за ГОСТ 9465-79;
- розміру заглиблення e ;
- розміру, що визначає глибину розташування площини торця гайки f ;
- робочої довжини отвору l_{po} під штифт конічний (відстань від площини контакту штифта і отвору за більшим діаметром d_1 та площиною номінального діаметру розгортки конічної) та допуском на нього.

Таким чином з рис. 3 видно, що торець штифта конічного діаметром d та перетин штифта, що характеризується більшим діаметром d_1 можуть займати положення у межах між верхнім і нижнім їх положеннями, що характеризуються розміром x .

Тоді

$$h = f(a, b, e, f, x) \quad (1)$$

Варто зазначити, що для визначення номінального значення розміру h необхідно враховувати і розмір x . При цьому номінальне значення розміру $x=0$, за умови співпадіння діаметрів штифта, отвору та їх кутів із номінальними їх значеннями, а також рівності номінальних значень l_{po} та l_{pu} при співпадінні нижнього торця штифта із площиною номінального діаметру розгортки конічної (рис. 3).

Виходячи з вищесказаного номінальне значення розміру h визначимо з розмірного ланцюга (рис. 4).

$$h = a + b + x - e - f. \quad (2)$$

Усі розміри, окрім e, f регламентуються ГОСТ 9465-79 та залежать від типорозміру та класу точності штифта. Розміри e, f задаються конструктором в залежності від типорозміру штифта, бо у відповідному стандарті на ШКЗ така інформація відсутня. Проте з аналізу креслень для різних типорозмірів штифтів та властивостей конічного з'єднання дані розміри можуть бути визначені, а саме:

- e – розмір заглиблення, як правило дорівнює сумарній величині довжини паска a (рис. 3) та кроку

різі p , для можливості створення осевого руху штифта під час демонтажу (проте конструктор може задавати й інше значення розміру, виходячи з особливостей конкретного вузла, де розміщене ШКЗ;

f – розмір, що визначає глибину розташування площини торця гайки, як правило дорівнює кроку різи p , але не менше 1 мм, адже він потрібен лише для формування площини під гайку.

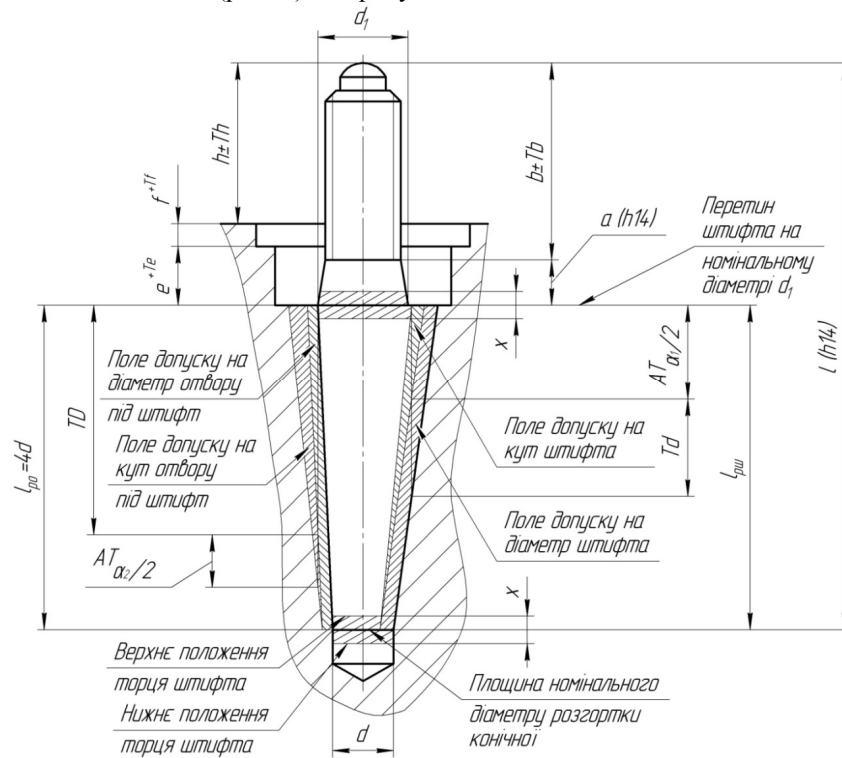


Рис. 3 – Ілюстрація параметрів ШКЗ, що впливають на величину вильоту торця штифта над поверхнею кришки

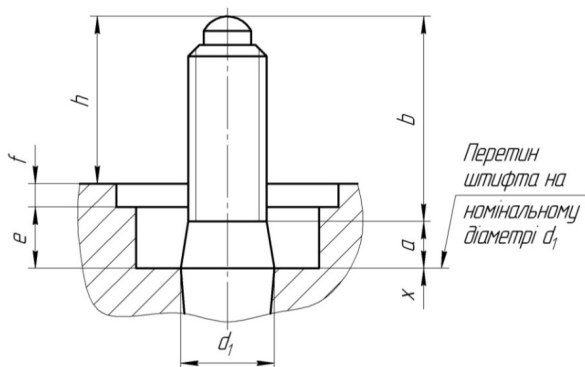


Рис. 4 – Розмірний ланцюг для визначення номінального значення розміру h

Тому для зручності розрахунку розміру h конструктору замінимо параметри e, f у формулі (1), на параметри, що будуть вказуються у ГОСТ 9465-79 для конкретного типорозміру штифта та не будемо враховувати x , адже його номінальне значення

дорівнює нулю та не впливає на розрахунок виступання торця штифта h :

$$h = a + b - a - p - p = b - 2p, \quad (3)$$

де p – крок різи на різьовій цапфі штифта конкретного типорозміру, мм.

З рис. 4 розмір h є замикаючою ланкою розмірного ланцюга. Відповідно допуск Th на даний розмір складається із суми допусків усіх складових ланок розмірного ланцюга.

$$Th = \sum(Ta, Tb, Te, Tf, Tx). \quad (4)$$

В свою чергу допуск на розмір x залежить від:

$$Tx = \sum(Td_o, TD_o, AT \frac{\alpha_1}{2_o}, AT \frac{\alpha_2}{2_o}, Tl_{po}, Tl_{pш}), \quad (5)$$

де Td_o – допуск на діаметр штифта конічного, приведений до значення осевого переміщення

штифта, мм; TD_o – допуск на діаметр отвору під штифт конічний, приведений до значення осьового переміщення штифта, мм; $AT \alpha_1/2o$ – допуск на половину кута штифта конічного, приведений до значення осьового переміщення штифта, мм; $AT \alpha_2/2o$ – допуск на половину кута отвору під штифт конічний, приведений до значення осьового переміщення штифта, мм; Pl_{po} – допуск на робочу довжину отвору під штифт конічний, мм; $Pl_{пу}$ – допуск на робочу довжину конусу штифта, мм.

Параметри ШКЗ, такі як $l_{пу}$ та l_{po} впливають на місце розташування нижнього торця штифта та перетину штифта на номінальному діаметрі d_1 в межах допуску на розмір x . Як правило для з'єднань двох деталей l_{po} є довідковим розміром [13] на який не вказується допуск, тому $Pl_{po}=0$. Номінальне значення $l_{po}=4d$. Розмір $l_{пу}$ за ГОСТ 9465-79 не вказується на в стандарті і є замикаючою ланкою в розмірному ланцюгу з розмірами l , a , b (рис. 2), та залежить від значень цих розмірів. Номінальне значення $l_{пу}=4d$.

При цьому допуски на діаметри отвору і штифта, а також допуски на кутові розміри отвору та штифта впливатимуть на допуск Th через різний тип контакту робочих поверхонь штифта і отвору [1], через зміну положення нижнього торця штифта відносно площини номінального діаметру розгортки конічної (рис. 3).

Для знаходження розміру $l_{пу}$ та допуску на нього розглянемо розмірний ланцюг на рис. 5.

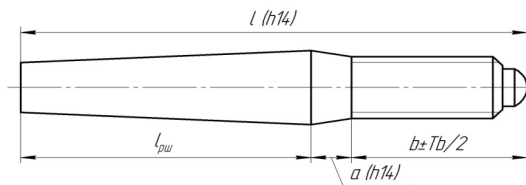


Рис. 5 – Розмірний ланцюг для визначення номінального значення розміру $l_{пу}$ та допуску на нього

$$l_{пу} = l - a - b. \quad (6)$$

$$Pl_{пу} = \sum(Tl, Ta, Tb). \quad (7)$$

Але якщо ми вже враховуємо в формулі (7) допуски Ta і Tb , то ми не можемо їх враховувати ще раз у формулі (4), тому врахуємо їх у формулі (7), виключивши із формули (4). В результаті формула (4) прийме вигляд:

$$Th = \sum(Te, Tf, Tx), \quad (8)$$

де у Tx будуть враховані усі допуски на вищеписані змінні параметри ШКЗ.

Для визначення інших складових допусків Tx необхідно привести значення відхилень діаметрів d , D та кутів $\alpha_1/2$, $\alpha_2/2$ до значень осьових переміщень штифта, які виникатимуть в залежності від фактичних

значень вищевказаних параметрів у межах допусків на них. Для цього як приклад розглянемо рис. 6 із зображенням допуску на діаметр штифта в ШКЗ для приведення його до Td_o .

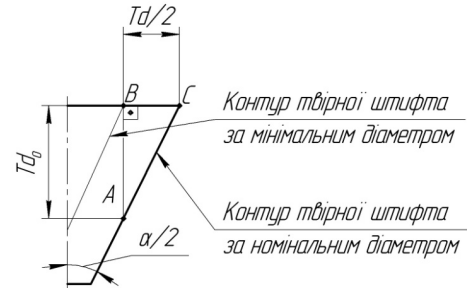


Рис. 6 – Графічне представлення приведення допуску на діаметр штифта Td до осьового переміщення штифта Td_o

З рис. 6 розглянемо трикутник ABC, у якому:

- $BC=Td/2$ – половина допуску (радіальний допуск) на діаметр штифта, значення якого відоме за стандартом та залежить від класу точності та діаметра штифта;

- кут $BAC = \alpha/2 = 34'23''$ за стандартом (для ШКЗ з конусністю 1:50);

- сторона $AB = Td_o$ – шуканий параметр.

Виконавши перетворення, отримаємо:

$$Td_o = \frac{Td}{2 \cdot tg \frac{\alpha}{2}} \quad (9)$$

Аналогічно для допуску на діаметр отвору під штифт в ШКЗ:

$$TD_o = \frac{TD}{2 \cdot tg \frac{\alpha}{2}} \quad (10)$$

Виконаємо аналогічні дії для приведення допуску на половину кута штифта конічного $AT \alpha_1/2$ до значення осьового переміщення штифта $AT \alpha_1/2o$, враховуючи при цьому номінальні значення довжин робочих поверхонь штифта та отвору $l_{пу}=l_{po}=4d$:

$$AT \frac{\alpha_1}{2o} = \frac{4d \cdot tg \frac{AT \alpha_1}{2}}{tg(\frac{\alpha}{2} \pm \frac{AT \alpha_1}{2})} \quad (11)$$

Аналогічно для допуску на кут отвору під штифт в ШКЗ:

$$AT \frac{\alpha_2}{2o} = \frac{4d \cdot tg \frac{AT \alpha_2}{2}}{tg(\frac{\alpha}{2} \pm \frac{AT \alpha_2}{2})} \quad (12)$$

Підставивши всі отримані значення допусків на змінні параметри ШКЗ у формулу (5) та виконавши перетворення спрощення отримаємо:

$$Tx = \frac{Td+TD}{2 \cdot tg \frac{\alpha}{2}} + \frac{4d \cdot tg \frac{AT\alpha_1}{2}}{tg(\frac{\alpha}{2} + \frac{AT\alpha_1}{2})} + \frac{4d \cdot tg \frac{AT\alpha_2}{2}}{tg(\frac{\alpha}{2} - \frac{AT\alpha_2}{2})} + Tl + Ta + Tb. \quad (13)$$

Усі значення розмірів та допусків на них у формулі (13) є вказаними у відповідних стандартах на ШКЗ, тому Tx може бути визначений для ШКЗ з будь-якими параметрами. Підставивши формулу (13) у формулу (8) отримаємо шукане значення допуску Th :

$$Th = \frac{Td+TD}{2 \cdot tg \frac{\alpha}{2}} + \frac{4d \cdot tg \frac{AT\alpha_1}{2}}{tg(\frac{\alpha}{2} + \frac{AT\alpha_1}{2})} + \frac{4d \cdot tg \frac{AT\alpha_2}{2}}{tg(\frac{\alpha}{2} - \frac{AT\alpha_2}{2})} + Tl + Ta + Tb + Te + Tf. \quad (14)$$

Для автоматизації розрахунків розміру h за формулою (3) та допуску на нього Th за формулою (14) у якості рекомендації конструктору варто застосовувати програмні пакети MathCAD, Microsoft Excel або інші доступні програми, що дозволяють виконувати автоматизовані розрахунки при заданні відомих параметрів за відповідними стандартами та значень розмірів (e , f) та допусків на них, що конструктор задає на кресленні ШКЗ. Для підприємства, що займається виробництвом насосів з використанням ШКЗ доцільним буд розроблення автоматизованого модулю розрахунку h і Th , а також величини натягу в ШКЗ.

Граничні відхилення можна визначити за допомогою відомих формул визначення верхнього та нижнього відхилень замикаючої ланки у розмірних ланцюгах [16] за величиною допуску та координатою середини поля допуску замикаючої ланки.

Для прикладу виконаємо розрахунок величини виступання торця штифта h над поверхнею кришки та допуску на нього Th для ШКЗ номінальним діаметром 10 мм. Необхідні для розрахунку параметри оберемо за ГОСТ 9465-79 для штифта класу точності В, як найбільш поширеного при застосуванні в насосному обладнанні:

$$d = 10 \text{ мм};$$

$$b - \text{за ГОСТ 9465-79 } \min=24 \text{ мм, } \max=27 \text{ мм};$$

$Tb = 3$ мм. Так як номінального значення параметра b стандарт не встановлює, і згідно рекомендацій призначення полів допусків на лінійні розміри, так як вони проставлені на рис. 5, то поле допуску на розмір b має бути симетричним. Тобто враховуючи значення мінімального і максимального значення розміру, номінальний розмір $b = 25,5$ мм;

$$l = 70 \text{ h}14(0; -0,74) \text{ мм, } Tl = 0,74 \text{ мм};$$

$$a = 4,5 \text{ h}14(0; -0,3) \text{ мм, } Ta = 0,3 \text{ мм};$$

$$p = 1,5 \text{ мм} - \text{ крок різі на різьбовій цапфі штифта};$$

$$Td = 0,09 \text{ мм} - \text{ для штифта } \text{Ø}10 \text{ h}11(0; -0,09);$$

$TD = 0,036$ мм – для отвору під штифт $\text{Ø}10 \text{ h}9(0; -0,036)$ – поле допуску за діаметром розгортки конічної;

$e = a + p = 4,5 + 1,5 = 6 \text{ H}14(+0,3; 0) \text{ мм} - \text{ з рис. 4, } Te = 0,3 \text{ мм};$

$$f = p = 1,5 \text{ H}14(+0,25; 0) \text{ мм} - \text{ з рис. 4, } Te = 0,25 \text{ мм};$$

$\alpha/2 = 34'23''$ – половина кута ШКЗ з конусністю 1:50;

$$AT \alpha_1/2 = 5'10'' [15];$$

$$AT \alpha_2/2 = 2'10'' [15];$$

Отже за формулою (6):

$$h = b - 2p = 25,5 - 2 \cdot 1,5 = 22,5 \text{ мм.}$$

За формулою (14):

$$Th = \frac{0,09+0,036}{2 \cdot tg \frac{\alpha}{2}} + \frac{4 \cdot 10 \cdot tg 5'10''}{tg(34'23'' + 5'10'')} + \frac{4 \cdot 10 \cdot tg 2'10''}{tg(34'23'' - 2'10'')} + 0,74 + 0,3 + 3 + 0,3 + 0,25 = 8,29 \text{ мм.}$$

З результатів розрахунків розміру $h=22,5$ мм та його допуску $Th=8,29$ мм для ШКЗ $\text{Ø}10$ мм з конусністю 1:50 за методом максимуму-мінімуму можна говорити про некоректність вказання конструктором допуску на розмір $h \pm 2$ мм, адже конструктор дає допуск 4 мм, а в теорії даний параметр може складати 8,29 мм. Звісно розрахунок допуску за методом максимуму-мінімуму передбачає, що всі розміри будуть знаходитись на межі своїх граничних допустимих значень, що на практиці майже ніколи не зустрічається. Проте з наукової точки зору за формулою (14) цей варіант можливий. При цьому варто зауважити, що граничні відхилення навряд чи будуть розташовуватися симетрично відносно номінального розміру, як вказується конструктором на кресленні. В результаті величина виступання торця штифта та особливо допуск на даний параметр не можуть бути об'єктивними критеріями для оцінювання якості складання ШКЗ.

Тому у якості рекомендацій конструктору варто запропонувати вносити на креслення розмір h як довідковий без вказання допуску на нього, та у технічних вимогах вказати величину натягу в ШКЗ, з рекомендацій у розгляді попередніх пунктів технічних вимог. Практичні рекомендації щодо обґрунтованої величини натягу детально будуть розглянуті в наступних публікаціях на основі експериментальних досліджень.

Вимога про введення до складу виробу гайки, яка сполучається з поверхнею різьбової частини штифта конічного і необхідна тільки для демонтажу, створює додаткові проблеми на етапі складання. А саме, на кресленні не вказано з яким зусиллям повинна бути затягнута гайка. Це створює протиріччя, так як для можливості транспортування і роботи агрегату, під час яких присутні поштовхи і вібрації гайка не повинна відкручуватися, тобто повинна бути затягнута з необхідним зусиллям, якщо в конструкції не передбачені елементи, що перешкоджають її само відгвинчуванню (таких елементів конструктором не передбачено). Таким чином зусилля повинне бути досить високим щоб створити пластичну деформацію

між різьями штифта і гайки. З іншого боку при затягуванні гайки з достатнім для її стопоріння зусиллям, натяг в ШКЗ зменшиться до нульового значення і штифт неминуче витягнеться з отвору. Тому для запобігання подібних ситуацій рекомендується видалити зі складального креслення гайку, призначену для демонтажу і перенести її в комплект запасних частин і пристроїв.

Вказівки вимоги до шорсткості поверхні конічного отвору під штифт - Ra 1,6 мкм на кресленнях ШКЗ змушує використовувати дорогі імпорتنі розгортки з доведеними різальними кромками замість стандартних розгорток за ГОСТ 10081-84 та ГОСТ 11177-84. Так як, згідно з технічними умовами на розгортки конічні 1:50 за ГОСТ 10083-81, вони гарантують отримання шорсткості не більше ніж Rz 12,5 мкм, що відповідає Ra 3,2 мкм відповідно до ГОСТ 2789-73. Але використання дорогих розгорток не гарантує отримання необхідної площі контакту в ШКЗ, так як розгортки лише забезпечують необхідну шорсткість - Ra 1,6 мкм. Але в зв'язку з тим, що висота мікрогребінців при шорсткості Ra 1,6 мкм досить низька і при запресовуванні штифта в отвір ці мікрогребінці досить складно піддаються зминанню, то з великою часткою ймовірності будуть відбуватися пластичні деформації поверхні отвору, так як твердість матеріалу деталей, що сполучаються, як правило, менше ніж твердість штифта. Це буде особливо критичним при несприятливих умовах для запресовування, а саме під час істотної різниці кутів отвору і штифта в межах допусків на них. Адже штифти з різних партій можуть відрізнятися за кутом до 1'30", а отвори під них взагалі до 5'24", що вже доведено в [1], тому мала шорсткість отворів в даному випадку позитивно не впливає на досягнення необхідної площі контакту і як наслідок виконання службового призначення ШКЗ. На практиці часто виникають випадки зминання поверхонь деталей, що веде до «відриву» матеріалу, зменшення площі контакту і як наслідок втрати головної функції ШКЗ.

Тому в якості рішення рекомендується на кресленнях ШКЗ змінити параметр шорсткості з Ra 1,6 мкм на шорсткість у діапазоні Ra 3,2...6,3 мкм, що буде експериментально перевірено в подальших дослідженнях.

Ще одним недоліком креслення ШКЗ, що наведено в СТП підприємства є відсутність величини допуску на отвір, який свердлиться при сумісній обробці деталей для обробки конічної поверхні під конічну розгортку. Цього допуску немає і в технологічних процесах, адже в п.3.4а ГОСТ 10083-81 сказано, що отвір під розгортку конічну з конусністю 1:50 має отримуватись свердлом діаметром, що дорівнює номінальному діаметру штифта конічного або розгортки. У результаті отвір свердлиться за відхиленням Н14, що з точки зору технолога та робітників у цеху вважається правомірним. Інакше кажучи для отримання отвору під конічну розгортку

обирають свердло, рівне номінальному (меншому) діаметру штифта, адже інше конструктором не вказано. У результаті чого часто виникає поява браку в ШКЗ, через недостатню площу контакту отвору і штифта. Причиною цього є те, що при отриманні отвору на межі його верхнього відхилення в межах допуску за Н14 на поверхні нижньої частини отвору не залишається припуску для калібрування поверхні розгорткою (рис. 17), тому ця частина отвору залишається циліндричною «з під свердла». В результаті контакт зі штифтом там відсутній. У якості рішення цієї проблеми рекомендується на кресленнях проставити обґрунтовані допуски розміру на отвір під оброблення розгортками конічними. Для цього виконаємо розрахунок величини допустимого відхилення діаметра отвору під розгортку конічну, виходячи з необхідності калібрування розгорткою усєї робочої довжини отвору в ШКЗ, аж до площини номінального діаметру розгортки конічної [13].

На рис. 7 відстань від умовної площини номінального діаметру розгортки конічної до низу попередньо просвердленого отвору, як правило дорівнює половині діаметру останнього. Дана відстань необхідна для виходу нижньої частини розгортки, щоб запобігти її передчасному контакту з торцем отвору до моменту формування конічної поверхні на усій робочій довжині отвору під штифт. Як правило дана відстань складає не більше 0,5 номінального діаметра штифта, адже більше перевищення є недоцільним та може привести до надмірного заглиблення штифта і зменшення довжини його контакту вже у верхній з'єднувальній деталі – кришці у результаті суттєвого збільшення більшого діаметру отвору, що справедливо і для наскрізного отвору також.

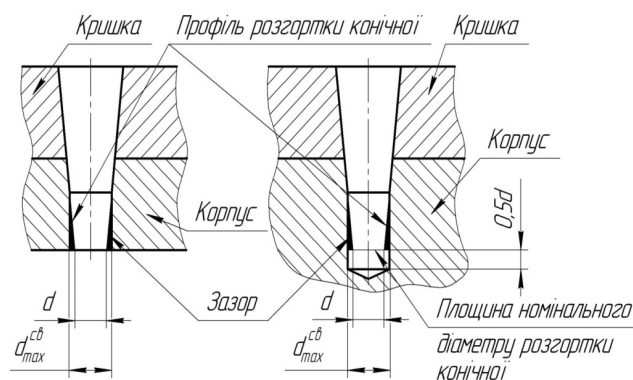


Рис. 7 – Ілюстрація виникнення зазору між розгорткою конічною і оброблюваною поверхнею для наскрізного та глухого отворів

Тому для визначення величини допустимого відхилення попередньо просвердленого отвору під розгортку конічну задамося значенням обмеження глибини до якої може дійти штифт під час запресовування. Для можливості обов'язкового створення натягу у ШКЗ у глухому отворі має бути

запас для осьового руху штифта і недопущення його торкання до торця отвору до моменту створення необхідного за службовим призначенням натягу. Для наглядності розглянемо рис. 8 з геометричною побудовою отвору в ШКЗ.

З рис. 8 розглянемо трикутники ABC, DBO, EDF, які є прямокутними та подібними між собою з кутами BAC, BDO, DEF, що дорівнюють куту нахилу конічної поверхні штифта $\alpha/2$. Розглянемо трикутник DBO зі сторонами $BD=\Delta$, що відповідає осьовому переміщенню штифта при його запресовуванні в отвір та стороною BO, що дорівнює радіальному натягу $N_{рад}$ в ШКЗ, який має задаватися конструктором в залежності від службового призначення виробу де працює ШКЗ. Трикутник EBM є подібним трикутнику EDF, сторона якого $DF=z$ відповідає величині радіального запасу на величину осьовий зазору між нижнім торцем штифта та дном отвору, що також має задаватися конструктором в залежності від параметрів ШКЗ. При цьому сторона $BM=N_{рад}+z$. З трикутника EDF величина радіального запасу z :

$$z = \delta \cdot tg \frac{\alpha}{2}, \tag{15}$$

де δ - осьовий зазор між нижнім торцем штифта та дном отвору, мм.

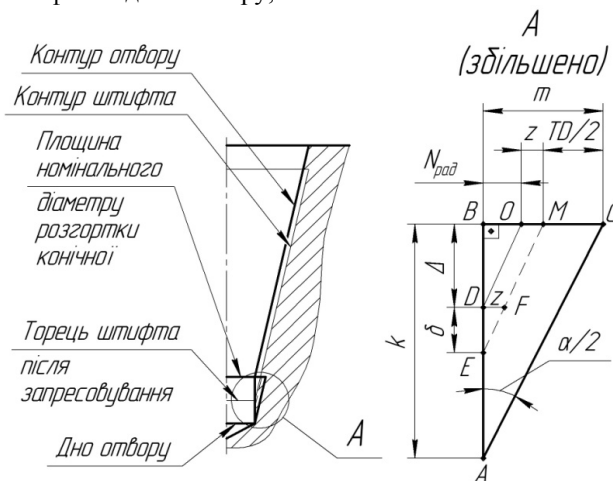


Рис. 8. Аналіз параметрів отвору під конічний штифт після свердління і оброблення розгорткою конічною

Розглянемо трикутник ABC зі сторонами $BC=m$, та $AB=k$. При цьому k дорівнює глибини отвору між площиною номінального діаметра розгортки та дном отвору (рис. 8), а m можна знайти за формулою:

$$m = k \cdot tg \frac{\alpha}{2} = N_{рад} + z + TD/2, \tag{16}$$

де k - глибина отвору між площиною номінального діаметра розгортки та дном отвору (рис. 8), мм; $N_{рад}$ - значення величини радіального натягу в ШКЗ, мм; $TD/2$ - значення половини допуску (радіального допуску) на отвір при свердлінні, мм.

Тобто TD це і є величина допуску, що залишається для можливості задання конструктору на кресленні.

Шляхом математичних перетворень переведемо значення радіального натягу в діаметральний, та з формули (16), підставивши замість величини виходу нижньої частини розгортки k рекомендоване її значення $0,5d$, визначимо TD :

$$TD = 2 \cdot 0,5 \cdot d \cdot tg \frac{\alpha}{2} - N - 2 \cdot \delta \cdot tg \frac{\alpha}{2} \tag{17}$$

для надання зручної для застосування формули у рекомендаціях конструктору при проектуванні ШКЗ множник $tg(\alpha/2)$ для $\alpha/2=34'23''$ буде дорівнювати 0,01, то підставимо у формулу (17) дане значення і отримаємо:

$$TD = 0,01 \cdot d - N - 0,02 \cdot \delta. \tag{18}$$

Виходячи із практичних міркувань та геометричної побудови (рис. 8), а також вказання коректних допусків на кресленнях ШКЗ значення осьового зазору між нижнім торцем штифта та дном отвору - δ можна прийняти рівним $0,1 \cdot k$, або ж якщо виразити через діаметр, то $\delta=0,001 \cdot d$, тоді вираз (18) прийме вигляд:

$$TD = 0,009 \cdot d - N. \tag{19}$$

Варто зауважити, що формула (19) є справедливою лише для ШКЗ з конусністю 1:50. Для розрахунку величини допуску попередньо просвердленого отвору під розгортку для інших розмірів конусностей варто використовувати формулу (17). Під час проектування також варто враховувати інші конструктивні особливості конкретного вузла, спираючись на методику наведену у даній роботі.

Виконаємо розрахунок величини допуску обробленого під розгортку отвору на прикладі ШКЗ з діаметром штифта 10 мм та величиною діаметрального натягу 0,015 мм, що є достатньою виходячи з аналогічних значень максимальної величини натягу для штифтових циліндричних з'єднань при посадці H7/m6, тоді за формулою (19):

$$TD = 0,009 \cdot 10 - 0,015 = 0,075 \text{ мм.}$$

Виходячи зі значення $TD = 0,075$ мм дане значення може бути вказане на кресленні, як допуск розміру отвору під штифт конічний Ø10. Найближче стандартне значення допуску на Ø10 складає 0,058, що відповідає 10-му квалітету точності. Так як основне відхилення на отвори переважно H, то на кресленні має бути вказано розмір отвору під штифт Ø10H10. Отримання 10-го квалітету точності отворів передбачає у технологічному процесі два переходи: свердління та зенкерування або свердління та чорнове розсорткування. І вже за цими відомими рекомендаціями технолог призначить діаметри

різальних інструментів для отримання розміру $\varnothing 10H10$ згідно креслення.

Висновки

У роботі вперше виявлено недоліки у технічних вимогах до ШКЗ, а саме встановлено, що креслення ШКЗ містять недостатньо інформації, необхідної для його виготовлення з необґрунтованими значеннями деяких параметрів. По кожному з недоліків наведені рекомендації конструктору, щодо їх усунення.

На основі геометричного аналізу ШКЗ встановлено, що номінальний розмір виступання торця штифта конічного в ШКЗ над поверхнею з'єднувальних деталей залежить від параметрів різьбової цапфи, а допуск на нього від багатьох геометричних факторів ШКЗ, які до цього не розглядалися науковцями і не враховувались конструкторами. Запропоновані конструктору рекомендації у якості математичної залежності в загальному вигляді для визначення розміру виступання торця штифта та допуску на нього, що можуть бути застосовані на підприємствах для ШКЗ із будь-яким значенням конусності, з набором початкових значень параметрів, що обираються під час проєктування із відповідних стандартів. Запропонована залежність перевірена шляхом порівняння розрахункових значень шуканих параметрів виступання торця штифта з геометричною побудовою ШКЗ $\varnothing 10$ за граничними допустимими відхиленнями розмірів.

Науково обґрунтовано визначення величини допуску на розмір отвору під оброблення розгортками конічними та запропонована формула, що за умови застосування типової технології оброблення для отворів відповідної точності, дозволить виключити можливість появи браку в ШКЗ через недостатню площу контакту в ньому.

Також теоретично доведено, що вимога конструктора та забезпечення шорсткості отвору під штифт на рівні Ra 1,6 мкм є не обґрунтованою, що у подальшому потребує експериментального підтвердження, адже досягнення цього параметру не гарантує необхідної площі контакту у ШКЗ, а лише збільшує собівартість виготовлення ШКЗ.

Список літератури

1. Дегтярьов І. М., Нешта А. О., Самардак М. П., Кононович В. М., Кушніров П. В., Бага В. М. та ін. Аналіз застосування конструкцій та області контакту штифтових конічних з'єднань з конусністю 1:50. *Технічні науки та технології*. 2021. №3(25) (у друці).
2. Меновщиків В. А., Козлов В. А. *Соединение деталей машин общего назначения: учебное пособие*. Красноярск: Изд-во Краснояр. гос. аграр. ун-та., 2019. 169 с.
3. Кондусь В. Ю., Котенко О. І. *Лопатеві насоси: навчальний посібник*. Суми: Сумський державний університет, 2021. 293 с.

4. Немецкие-стандарты URL: <https://p.dw.com/p/2pK0g> (дата звернення: 23.10.2021).
5. Obeidi M., McCarthy E., Kailas L., Brabazon D. Laser surface texturing of stainless steel 316L cylindrical pins for interference fit applications. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018. № 252. P. 58-68. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.09.016.
6. Ionica D., Galațanu S., Ionica A., Slavici T. Analysis of the insertion force in a Fork-Pin contact. *Materials Today: Proceedings*. 2021. № 45 (5). P. 4237-4241. doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.197.
7. Sun Y., Hu W., Shen F., Meng O., Xu Y. Numerical simulations of the fatigue damage evolution at a fastener hole treated by cold expansion or with interference fit pin. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016. № 107. P. 188-200. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2016.01.015.
8. Rosochowska M., Rosochowski A., Olejnik L. FE simulation of micro-extrusion of a conical pin. *International Journal of Material Forming*. 2010. № 3(1). P. 423-426. doi: 10.1007/s12289-010-0797-x.
9. Nachiar S., Shilpa P., Satyanarayanan K., Anandh S. Modeling and analysis of a pin jointed plane frame using Biomimicked structural elements. *Materials Today: Proceedings*. 2021. In Press, Corrected Proof. doi: 10.1016/j.matpr.2021.06.313.
10. Eberl L., Avila Gray L., Zaremba S., Drechsler K. The effect of fiber undulation on the strain field for pinned composite/titanium joints under tension. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. № 103. P. 148-160. doi: 10.1016/j.compositesa.2017.09.015.
11. Lee S., Jeong J., Ahn S., Lieu Q., Lee J. Performance of quadruplex module tensegrities using new pin-jointed connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020. № 172. P. 105763-105774. doi: 10.1016/j.jcsr.2019.105763.
12. Hove van B.W.E.M., Soetens F. Experimental research on pinned connections in aluminium truss girders. *Aluminium Structures; Material related Structural Design (MSD) (Heron, Delft University of Technology)*. 2010. № 55(3). P. 59-77. doi: 10.3233/978-1-60750-586-0-129.
13. Дегтярев И. М., Нешта А. А., Самардак Н. Ф. К вопросу об области применения различных конструкций штифтовых соединений в машиностроении. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем - 2020 : тези доповідей. Національний університет «Чернігівська політехніка»*. 2020. с. 180-183.
14. Дегтярьов І. М., Нешта А. О., Самардак М. П., Парфенцев І. С. Порівняльний аналіз конструкцій конічних та циліндричних штифтових з'єднань. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем - 2021: тези доповідей. Національний університет «Чернігівська політехніка»*. 2021. с. 150-151.
15. Анурьев В. И. *Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. Т. 1*. Москва: Машиностроение. 2015. 928 с.
16. Кравченко Л. С. *Размерный анализ при проектировании, изготовлении и сборке : учебное пособие*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. 352 с.

References (transliterated)

1. Dehtiarov I. M., Neshta A. O., Samardak M. P., Kononovych V. M., Kushnirov P. V., Baga V. M. et al. Analiz zastosuvannia konstruktarii ta oblasti kontaktu

- shtyftovykh konichnykh ziednan z konusnitiu 1:50 [Analysis of application of structures and contact area of pin joints with taper 1:50]. *Technical sciences and technologies*. 2021. Vol. 3, no. 25 (In print).
- Menovshchikov V. A., Kozlov V. A. *Soedinenie detalej mashin obshchego naznacheniya: uchebnoe posobie* [Connection parts of general purpose machines: a tutorial book], Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Agricultural University Publ., 2019. 169 p.
 - Kondus V. Y., Kotenko O. I. *Lopatevi nasosy: navchalnyi posibnyk* [Vane pumps: a tutorial book]. Sumy. Sumy State University Publ., 2021. 293 p.
 - German standards: Available at: <https://p.dw.com/p/2pK0g> (accessed: 23.10.2021).
 - Obeidi M., McCarthy E., Kailas L., Brabazon D. Laser surface texturing of stainless steel 316L cylindrical pins for interference fit applications. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018. Vol. 252, pp. 58-68, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.09.016.
 - Ionica D., Galațanu S., Ionica A., Slavici T. Analysis of the insertion force in a Fork-Pin contact. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45, no. 5, pp. 4237-4241, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.197.
 - Sun Y., Hu W., Shen F., Meng O., Xu Y. Numerical simulations of the fatigue damage evolution at a fastener hole treated by cold expansion or with interference fit pin. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016. Vol. 107, pp. 188-200, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2016.01.015.
 - Rosochowska M., Rosochowski A., Olejnik L. FE simulation of micro-extrusion of a conical pin. *International Journal of Material Forming*. 2010. Vol. 3, no. 1, pp. 423-426, doi: 10.1007/s12289-010-0797-x.
 - Nachiar S., Shilpa P., Satyanarayanan K., Anandh S. Modeling and analysis of a pin jointed plane frame using Biomimicked structural elements. *Materials Today: Proceedings*. 2021. In Press, Corrected Proof, doi: 10.1016/j.matpr.2021.06.313.
 - Eberl L., Avila Gray L., Zarembo S., Drechsler K. The effect of fiber undulation on the strain field for pinned composite/titanium joints under tension. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. Vol. 103, pp. 148-160, doi: 10.1016/j.compositesa.2017.09.015.
 - Lee S., Jeong J., Ahn S., Lieu Q., Lee J. Performance of quadruplex module tensegrities using new pin-jointed connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020. Vol. 172, pp. 105763-105774, doi: 10.1016/j.jcsr.2019.105763.
 - Hove van B.W.E.M., Soetens F. Experimental research on pinned connections in aluminium truss girders. *Aluminium Structures; Material related Structural Design (MSD) (Heron, Delft University of Technology)*. 2010. Vol. 55, no. 3, pp. 59-77, doi: 10.3233/978-1-60750-586-0-129.
 - Dehtiarov I., Neshta A., Samardak N. [On the question of the field of application of various designs of pin joints in mechanical engineering]. *Kompleksne zabezpechennia iakosti tekhnologichnykh protsesiv ta system. Materialy X mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii. Ch. 1 (29–30 kvitnia 2020 r. Chernihiv)* [Complex safekeeping of technological processes and systems. Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference. Ch. 1 (29–31 April 2020, Chernihiv)]. Chernihiv, ChNTU Publ., 2020, p. 180-183.
 - Dehtiarov I., Neshta A., Samardak N., Parfentsev I. [Comparative analysis of the design of conical and cylindrical pin joints]. *Kompleksne zabezpechennia iakosti tekhnologichnykh protsesiv ta system. Materialy XI mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii. Ch. 1 (26–27 travnya 2021 r. Chernihiv)* [Complex safekeeping of technological processes and systems. Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference. Ch. 1 (26–27 May 2021, Chernihiv)]. Chernihiv, ChNTU Publ., 2021, p. 150-151.
 - Anuriev V. I. *Spravochnik konstruktora-mashinostroitelia* [Handbook of the constructor-mechanical engineer]. Moscow. Manufacturing, 2015. 928 p.
 - Kravchenko L. S. *Razmernyi analiz pri proektirovanii, izgotovlenii i sborke: Ucheb. posobie dlia studentov mashinostroitelnykh spetsialnostei*. [Dimensional analysis in design, manufacture and assembly: a tutorial book for students of engineering specialties], Kharkiv: NTU «KHPI» Publ., 2009. 352 p.

Відомості про авторів (About authors)

Десятьоров Іван Михайлович – канд. техн наук, Сумський державний університет, старший викладач кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів, м. Суми, Україна; ORCID: 0000-0001-8535-987X; e-mail: ivan_dehtiarov@tmvi.sumdu.edu.ua

Ivan Dehtiarov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Lecturer, Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University, Sumy, UKRAINE; ORCID: 0000-0001-8535-987X; e-mail: ivan_dehtiarov@tmvi.sumdu.edu.ua

Нешта Анна Олександрівна – канд. техн наук, Сумський державний університет, старший викладач кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів, м. Суми, Україна; ORCID: 0000-0003-4072-5439; e-mail: anna_neshta@tmvi.sumdu.edu.ua

Anna Neshta – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Assistant, Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University, Sumy, UKRAINE; e-mail: anna_neshta@tmvi.sumdu.edu.ua

Самардак Микола Пилипович – інженер, ПАТ «Сумський завод «Насосенергомаш», м. Суми, Україна; e-mail: samardaknik@gmail.com

Mykola Samardak – engineer, PAO «Sumy plant «Nasosenergomash» Sumy, UKRAINE e-mail: samardaknik@gmail.com

Кононович Віталій Миколайович – Сумський державний університет, аспірант кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів, м. Суми, Україна; e-mail: v.kononovych@tmvi.sumdu.edu.ua

Vitalii Kononovych – PhD student Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University, Sumy, UKRAINE; e-mail: v.kononovych@tmvi.sumdu.edu.ua

Клок Ярослав Васильович – студент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів, м. Суми, Україна; e-mail: yarikkklok11@gmail.com

Yaroslav Klok – student Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University, Sumy, UKRAINE; e-mail: yarikkklok11@gmail.com

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Дегтярьов І. М., Нешта А. О., Самардак М. П., Кононович В. М., Клок Я. В. Аналіз геометричних параметрів та технічних вимог до штифтових конічних з'єднань у вузлах насосів. *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 24-35. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.04.

Please cite this article as:

Dehtiarov I., Neshta A., Samardak N., Kononovych V., Klok Y. Analysis of geometric parameters and technical requirements for pin conical joints in pump nodes. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4 (10), pp. 24-35, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.04.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Дегтярев И. М., Нешта А. А., Самардак Н. Ф., Кононович В. Н., Клок Я. В. Анализ геометрических параметров и технических требований к штифтовым коническим соединениям в узлах насосов. *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 24-35. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.04.

АННОТАЦИЯ В статье проанализированы причины возникновения ситуации с появлением погрешностей изготовления и отсутствие необходимых технических требований для выполнения коническим штифтовым соединением его служебного назначения. Анализ выполнялся на основе геометрического построения сборочной размерной цепи из двух подлежащих соединению деталей и штифта конического с конусностью 1:50 по ГОСТ 9465-79, применяемого именно в штифтовых соединениях насосного оборудования. Геометрический анализ включал в себя выделение отклонений на линейные размеры и угловые отклонения. Значения угловых отклонений приводились к линейным значениям их проекций вдоль оси штифта для определения допуска на высоту выступания торца штифта над поверхностью сопрягаемых деталей. Также теоретически доказана необоснованность назначения показателя шероховатости отверстия под штифт на уровне Ra 1,6 мкм и его нецелесообразность при невозможности обеспечения необходимой длины контакта и предложено разрешение данного противоречия. Проведен детальный анализ технических требований чертежей узлов насосного оборудования, содержащих штифтовые конические соединения, и пункты соответствующих стандартов, что позволило выделить несоответствия требований и предложить рекомендации, выполнение которых обеспечит получение качественного соединения в соответствии с его служебным назначением. Анализ геометрических параметров штифтовых конических соединений впервые позволил определить зависимость высоты выступания торца штифта над поверхностью сопрягаемых деталей и допуска на данный параметр, а также предложить математические зависимости для их определения. Представленные зависимости могут использоваться на практике для обоснованного расчета при проектировании штифтовых конических соединений в узлах насосов и на машиностроительных предприятиях, где используются подобные соединения. Впервые представлено и обосновано определение величины допуска на размер отверстия под обработку коническими развертками, а также предложена формула расчета данного параметра, приведенная в рекомендациях для возможности их применения на предприятиях машиностроительного комплекса и в изделиях, в состав конструкции которых входят штифтовые конические соединения.

Ключевые слова: насосостроение; точность обработки; технологический процесс; конструкторская документация; конусность 1:50; величина натяга.

Надійшла (received) 23.11.2021

УДК 62-1/-9

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.05

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАЛИВНИХ БРИКЕТІВ PINI-KAY ЗА РАХУНОК МОДЕРНІЗАЦІЇ РОБОЧОЇ ЧАСТИНИ ПРЕСУ ПШ-250

А. Ю. ДОВГОПОЛОВ*, С. С. НЕКРАСОВ, З. А. РЕУТА

кафедра технології машинобудування верстатів та інструментів, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА
*e-mail: d_a_u_@ukr.net

АНОТАЦІЯ Проведені дослідження, пов'язані із забезпеченням продуктивності виготовлення паливних брикетів типу «Pini-Kay» шляхом модернізації робочої частини пресу лінії для виробництва паливних брикетів продуктивністю 250 кг / год (ЛВБ-250). На даній лінії використовується прес ПШ-250, який є її основним робочим обладнанням, оскільки служить для пресування брикету під температурою, та є кінцевою ланкою в усьому процесі брикетування. У представленому дослідженні основним критерієм продуктивності вважалася кількість виготовленої продукції до моменту руйнування шліцьового шнека, оскільки руйнування змушує зупинити обладнання та проводити його заміну. Це, своєю чергою, зменшує кількість виготовленої продукції. Зазначено, що модернізація була проведена наступним чином: шліцьовий шнек, який є основним робочим органом пресу ПШ-250, виготовлений із конструкційної сталі (сталь 45) методом лиття, було замінено на шліцьовий шнек, що виготовлений методом механічної обробки на верстатах із ЧПК із високоякісної конструкційної легированої сталі 40ХМФА. Дана сталь використовується для виготовлення шліцьових валів, шатунів, штоків та найкраще підходить для виготовлення шліцьового шнека. Додатково, для підвищення конструкційної міцності шнеку була зроблена його термічна обробка – нормалізація. Запропоноване технологічне рішення дозволило підвищити продуктивність виготовлення паливних брикетів шляхом скорочення часу простоювання обладнання на ремонт та заміну робочих частин пресу ПШ-250. Це, своєю чергою, зменшило фінансові витрати підприємства на запасні частини та вплинуло на вартість готової продукції. Отримані результати показують, що запропоновані авторами шліцьові шнеки дозволили підвищити продуктивність виготовлення паливних брикетів майже в 10 раз, у порівнянні з попередніми результатами.

Ключові слова: паливні брикети «Pini-Kay»; продуктивність; механічна обробка; прес ПШ-250; шліцьовий шнек; робоча частина пресу

IMPROVING THE PRODUCTIVITY OF PINI-KAY FUEL BRIQUETTES BY MODERNIZING THE WORKING PART OF THE PSH-250 PRESS

A. DOVHOPOLOV, S. NEKRASOV, Z. REUTA

Department of Manufacturing Engineering Machines and Tools, Sumy State University, Sumy, UKRAINE

ABSTRACT The research related to the productivity of production of fuel briquettes of the "Pini-Kay" type, due to the modernization of the working part of the press line for the production of fuel briquettes with a capacity of 250 kg / h (LVB - 250) was carried out. It is known that the press used on this line is PSH-250, it is the main working equipment of this line, as it serves to press the briquette under temperature and is the closing link in the whole briquette process. In the presented study, the main criterion of productivity was considered to be the number of manufactured products before the break of the splined auger, because the breakdown forces to stop the equipment and replace it. This in turn reduces the number of manufactured products. The paper states that the modernization was carried out as follows: the slot screw, which is the main working body of the press PSH - 250, made of structural steel (steel 45) by casting, was replaced by a slotted screw made by machining on CNC machines, high-quality structural alloy steel 40HMFА. This steel is used to make splined shafts, connecting rods and rods, and is best suited for making a splined auger. In addition, to increase the structural strength, the workpiece of the auger, was made heat treatment - normalization. The proposed technological solution allowed to increase the productivity of fuel briquettes, by reducing the downtime of equipment for repair and replacement of working parts of the press PSH-250. This in turn reduced the company's financial costs for spare parts and affected the cost of finished products. The obtained results show that the slotted augers proposed by the authors allowed to increase the productivity of fuel briquettes production almost 10 times in comparison with the previous results.

Keywords: fuel briquettes «Pini-Kay», productivity, machining, press PSH-250, splined screw; working part of the press

Вступ

На сьогодні обсяги споживання електроенергії промисловими споживачами та населенням зростають дуже швидкими темпами, через високу вартість традиційних видів палива та зменшення їх промислових запасів. Своєю чергою, задача пошуку альтернативних та відновлювальних видів палива

вважається дуже актуальною задачею, яка потребує нагального вирішення. Найбільш перспективним видом альтернативного палива є тверде біопаливо вироблене із біомаси, яка містить рослини або їх частини, котрі залишаються як відходи у процесі обробки рослинної та деревинної сировини.

У сільському господарстві та на підприємствах деревообробної промисловості України виникає велика кількість відходів із рослинної сировини. Використавши ці відходи раціонально можливо підвищити ресурсоощадження та екологізацію виробництва. Впровадження передових технологій обробки відходів виробниками сільгосппродукції зменшує їхню кількість, покращує екологічну ситуацію, і як наслідок дозволяє отримати додатковий прибуток та енергетично цінну продукцію у вигляді паливних гранул чи брикетів.

Один із привабливих методів отримання твердого палива це його пресування із деревних та рослинних відходів. У процесі обробки відходи деревообробки подрібнюються, сушаться, висококалорійні відходи змішуються з низькокалорійними для підвищення однорідності та пресуються в брикети, але ці операції дуже енергозатратні. Аналізу процесу виробництва брикетованого палива та конструкцій машин для брикетування присвячена велика кількість наукових публікацій. Своєю чергою, в окремих публікаціях більше уваги надається енергозатратним технологічним процесам [1–8], в інших – технічним засобам [8,9].

Технологія виробництва паливних брикетів передбачає виконання таких технологічних процесів з біосировиною: подрібнення;

- сушіння;
- брикетування;
- охолодження;
- фасування.

Форма паливних брикетів досить різноманітна та має в основному просту конфігурацію. Виготовити брикети можливо з різної рослинної сировини (рис. 1), але це виробництво енергозатратне і потребує високої якості обладнання. Оптимальна вологість біосировини перед пресуванням у брикети має бути 8...12 %, фракційний склад – 1...3 мм [2,4,5,7].



Рис. 1 – Форми та конфігурації паливних брикетів з деревинної сировини [10]

Своєю чергою паливні брикети типу «Pini-Kay» мають форму неправильного багатогранника з характерною темною кіркою та отвором по центру (рис. 2). Розміри 50-80 x 200-300 мм. Назва походить від однойменної австрійської фірми «Pini-Kay» (нині не існує). В процесі виробництва застосовується не тільки пресування, а й випал поверхні. Через це паливні брикети набувають велику міцність і стійкість до вологи. Цей тип брикетів можна віднести до класу «преміум». Тому вони, як правило, коштують дорожче. Євро-дрова цього виду мають досить привабливий зовнішній вигляд і трохи більшу, в порівнянні з іншими, теплотворність. За рахунок наявності отворів брикети «Pini-Kay» мають втричі більшу площу поверхні. Тому дуже красиво горять.



Рис. 2 – Зовнішній вигляд паливних брикетів «Pini-Kay»

Оскільки паливні брикети «Pini-Kay» за якісними та кількісними показниками перевищують всі інші типи брикетів, кількість виробників, які займаються виготовленням даного брикету, з кожним роком зростає. Саме тому питання модернізації обладнання, яке виготовляє даний тип брикетів, дуже актуальне та потребує швидкого вирішення.

Мета роботи

Забезпечення продуктивності виготовлення паливних брикетів типу «Pini-Kay» шляхом модернізації робочої частини пресу ПШ-250 за рахунок скорочення часу простоювання обладнання на ремонт та заміну робочих частин.

Викладення основного матеріалу

Обладнання та принцип виготовлення паливних брикетів типу «Pini-Kay»

Технологія виробництва паливних брикетів розрізняє три способи формування брикетів. Перший спосіб – виробництво брикетів здійснюється на гідравлічних пресах надвисокого тиску. Після дії надвисокого тиску сировина перетворюється в «паливну цеглину». Ці паливні брикети досить нестійкі до вологи та тривалого транспортування, вони потребують якісного та щільного пакування. Проводити їх реалізацію бажано поряд із місцем виробництва.

Другим способом виробництва паливних брикетів є спосіб пресування за допомогою гідравлічних або кривошипно-шатунних пресів. Після зазначеного способу брикет набуває циліндричної форми. Паливні циліндри як і «паливні цеглини» не витримують силових навантажень та руйнуються, тому повинні реалізовуватися поряд із місцем виробництва [1].

Третій спосіб виробництва паливних брикетів передбачає механічну дію на сировину шнековими пресами. При такій обробці сировини поєднується два фактори – високий тиск та термічна обробка. Завдяки цьому лігнін, що міститься в сировині, стає своєрідним клеєм, який формує її в щільний брикет. Брикет отриманий цим способом має форму чотирих-, шести- або восьмигранника з осовим отвором і називається паливний брикет «Pini-Kau». Цей брикет має високу міцність до механічних впливів, що дозволяє його транспортувати на великі відстані [1].

Процес виготовлення паливних брикетів – це процес стискання сировини під високим тиском. У процесі брикетування сировини виникають сили тертя, вони спричиняють підвищення температури сировини та нагрівання робочих частин обладнання. За рахунок цього, у деревинній сировині, відбувається виділення лігніну, який є сполучною речовиною для формування брикету. Для формування брикети з іншої рослинної сировини можуть використовуватись екологічно чисті добавки (не більше 2%). Особливу увагу при виробництві брикетів необхідно приділяти вологості сировини, оскільки її значення впливає на щільність брикету. У випадку, якщо вологість сировини перевищує 14%, відбувається руйнування брикету [10].

Для виробництва паливних брикетів «Pini-Kau» використовуються шнекові преси (рис. 3) [10]. Для того, щоб провести пресуванням сировини та отримати паливні брикети «Pini-Kau», її додатково потрібно подрібнити та підсушити (вологість не повинна перевищувати 12...14% [10]).

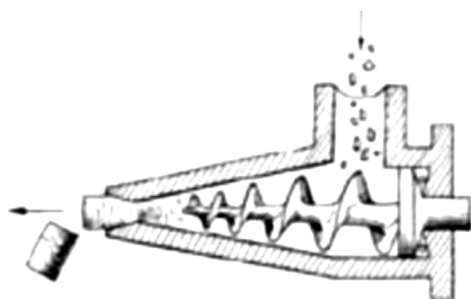


Рис. 3– Принципова схема шнекового пресування паливних брикетів [10]

За технічними характеристиками шнековий прес для виробництва паливних брикетів «Pini-Kau» легше поршневого, який використовується для виготовлення

паливних брикетів «Нестро», оскільки в ньому відсутні масивні поршні й маховики. Продукція в шнековому пресі виходить безперервно, тому її можна нарізати на шматки необхідної довжини. Густина брикетів у виготовлених шнековим пресом є більшою, ніж брикетів, що отримані у поршневих пресах.

Найбільш поширена установка для виробництва паливних брикетів – це установка ЛВБ-250 (лінія для виробництва паливних брикетів «Pini-Kau» продуктивністю 250 кг/год), що призначена для виробництва як шестигранних, так і чотирих-гранних брикетів з осовим отвором (рис. 4).

Лінія для виробництва паливних брикетів «Pini-Kau» продуктивністю 250 кг/год представлена на рис. 4 та складається з наступних конструктивних елементів: сушильний комплекс (продуктивність 300 кг/год – 1 шт., теплогенератор – 1 шт., калібратор (подача сировини) – 1 шт., шнековий завантажувач – 1 шт., прес для брикетів ПШ-250 (продуктивність 250 кг/год) – 1 шт., промислова витяжка – 1 шт.

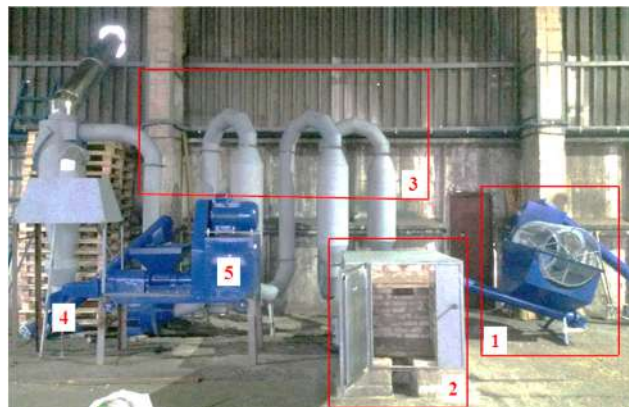


Рис. 4 – Лінія для виробництва паливних брикетів типу «Pini-Kau» продуктивністю 250 кг/год (ЛВБ – 250)

Процес виготовлення паливних брикетів типу «Pini-Kau» на установці ЛВБ-250 відбувається наступним чином: сировина для виготовлення паливних брикетів засипається в калібратор (позиція 1), який відсіює сировину великої фракції, далі із теплогенератора (позиція 2) гаряче повітря затягується циклоном в сушильний комплекс (позиція 3), де змішується із сировиною та доводить її до робочої температури (80 – 110°C). Із сушильного комплексу сировина надходить до шнекового навантажувача (позиція 4), який подає її в робочий картер пресу ПШ-250 (позиція 5), із картера робочий шнек давить сировину в формотворний ствол, який нагрітий до робочої температури пресування (250 – 450°C) із формотворного ствола виходить вже готові брикети «Pini-Kau».

На цій лінії використовується прес ПШ-250, який представлений на рис. 4, є основним робочим обладнанням даної лінії, оскільки служить для

пресування брикету під температурою та є ланкою що замикає в усьому процесі виготовлення.

Модернізація робочої частини пресу ПШ-250

Одним з основних складових елементів лінії для виробництва паливних брикетів «Pini-Kayu» (ЛВБ-250) є прес для брикетів ПШ-250 (продуктивність 250 кг/год). Даний прес складається з наступних конструктивних елементів (рис. 5), станина, електродвигун, робочий картер, формоутворювальний елемент (ствол), елемент нагрівання.



Рис. 5 – Прес ПШ-250 для виготовлення паливних брикетів типу «Pini-Kayu»

Процес виготовлення брикету в пресі ПШ-250 відбувається наступним чином: деревинна сировина подається в робочий картер пресу, з якого вона робочим шнеком видавлюється в формоутворювальний елемент (ствол) нагрітий до робочої температури (250 – 450°C). З формоутворювального ствола вже виходить готовий паливний брикет.

Основним робочим елементом пресу є робочий шнек, представлений на рис. 6.



Рис. 6 – Робочий шнек для виготовлення паливних брикетів «Pini-Kayu»

Робочий шнек складається з двох частин: шліцьовий шнек та робочий носик. Компонування з двох частин викликана тим, що перший виток носика за рахунок постійного тертя виходить із ладу після 5-6 тонн виготовленої продукції. Щоб не проводити заміну всього робочого шнеку після кожного зношення першого витка носика було вирішено робити носик змінним.

Ще однією проблемою робочого шнеку є те, що шліцьовий шнек з'єднується з робочим носиком через

спеціальне фігурне з'єднання. Оскільки робочий носик виготовляється методом лиття із високоміцного чугуна ВЧ 38-17, а шліцьовий шнек також методом лиття зі звичайної сталі марки 45, то дане з'єднання постійно руйнується в шліцьовому шнеку рис. 7. Дане руйнування, викликане поганою якістю лиття шліцьових шнеків виробником та призводить до його заміни після кожних 10–15 тонн виготовленої продукції, що значно знижує продуктивність та призводить до збільшення економічних затрат на виготовлення готової продукції.



Рис. 7 – Руйнування фігурного з'єднання в шліцьовому шнеку

Щоб уникнути руйнування фігурного з'єднання в шліцьовому шнеку, була розглянута можливість виготовлення шнеку методом механічної обробки на верстатах із ЧПК. Також для виготовлення нового варіанту шліцьового шнека було запропоновано змінити матеріал зі сталі 45 на високоякісну конструкційну леговану сталь 40ХМФА, яка використовується для виготовлення шліцьових валів, шатунів та штоків. Також додатково шліцьовому шнеку була зроблена термічна обробка – нормалізація. Креслення нового шліцьового шнека представлено на рис. 8. Фото виготовленого шнека представлено на рис.9.

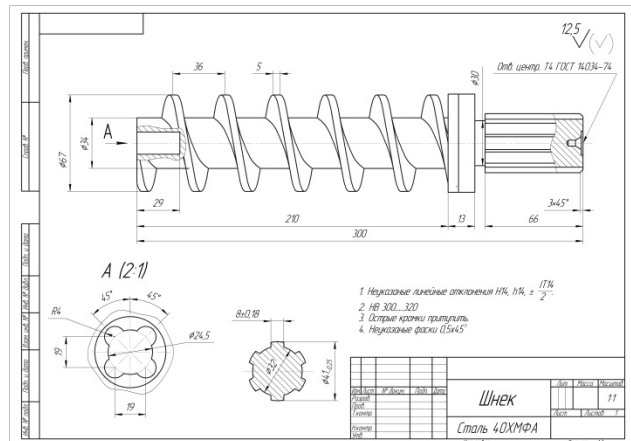


Рис. 8 – Креслення модернізованого шліцьового шнека, виготовленого методом механічної обробки



Рис. 9 – Фото виготовленого шпильового шнека методом механічної обробки

Забезпечення продуктивності виготовлення паливних брикетів типу «Pini-Kau»

Дослідження продуктивності проведені на підприємстві, яке займається виготовленням паливних брикетів «Pini-Kau» з тирси твердих порід. Для порівняння було взято три шнеки, виготовлені методом лиття зі сталі 45 та три шнеки зі сталі 40ХМФА, виготовлені методом механічної обробки на верстатах із ЧПК. Основним критерієм продуктивності вважалася кількість виготовленої продукції до моменту виходу із ладу шпильового шнека. Всі отримані дані зведені до табл. 1.

Таблиця 1 – Експериментальні дані дослідження продуктивності виготовлення паливних брикетів «Pini-Kau»

Номер шнеку	Марка сталі	Кількість виготовленої продукції, тони
№1	сталь 45	12
№2	сталь 45	10
№3	сталь 45	14
№4	сталь 40ХМФА	89
№5	сталь 40ХМФА	95
№6	сталь 40ХМФА	102

Згідно даних табл. 1 побудуємо графік, показаний на рис. 10, для більш наглядного розуміння результатів.

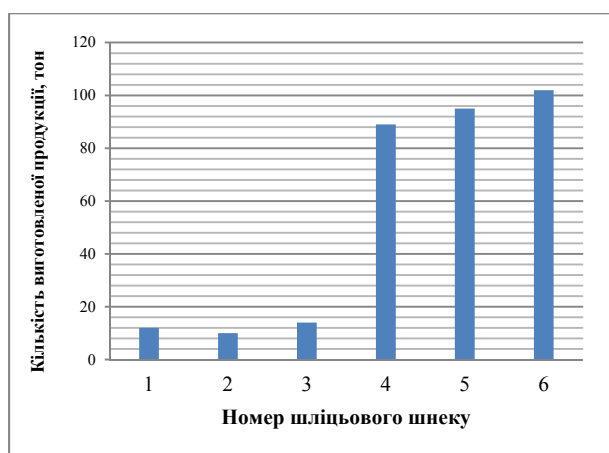


Рис. 10 – Кількість виготовленої продукції кожним із шпильових шнеків

Отримані результати показують, що запропоновані авторами шпильові шнеки дозволили забезпечити необхідну продуктивність виготовлення паливних брикетів майже в 10 раз (згідно з даними табл. 1). Своєю чергою, це дозволило зменшити фінансові витрати підприємства на запасні частини та скоротити час простоїв обладнання для заміни робочих органів пресу.

Для перевірки економічного ефекту від заміни шнеків виготовлених методом лиття зі сталі 45 на шнеки зі сталі 40ХМФА, виготовлених методом механічної обробки на верстатах із ЧПК зробимо наступне порівняння. Якщо взяти за основу ціну литого шнека 2500 грн, та ціну шнеку виготовленого методом механічної обробки 5000 грн та врахувати кількість продукції в грошовому еквіваленті яку вони виготовлять, то отримаємо наступні дані (табл. 2).

Таблиця 2 – Дані перевірки економічного ефекту від заміни шнеків виготовлених методом лиття із сталі 45 на шнеки зі сталі 40ХМФА, виготовлених методом механічної обробки

Номер шнека	Ціна шнека	Кількість продукції, т.	Ціна за тону брикету, грн..	Загальна ціна за брикет, грн..
№1	2500	12	5500	66000
№2	2500	10	5500	55000
№3	2500	14	5500	77000
№4	5000	89	5500	489500
№5	5000	95	5500	522500
№6	5000	102	5500	561000

Згідно з даними табл. 2, можна зробити висновок, що ціна шнеку виготовленого методом механічної обробки більша від ціни литого у два рази. Своєю чергою, шнек виготовлений методом механічної обробки, за економічними показниками, виготовляє продукції у 8 разів більше ніж литий.

Заміна шнеків отриманих методом лиття зі сталі 45 на шнеки зі сталі 40ХМФА, отриманих методом механічної обробки на верстатах із ЧПК, дозволила підвищити економічність виготовлення паливних брикетів у 8 разів.

Висновки

В роботі проведено дослідження, пов'язані із забезпеченням продуктивності виготовлення паливних брикетів типу «Pini-Kau» за рахунок модернізації робочої частини пресу ПШ-250. Виготовлення шпильового шнека методом механічної обробки на верстатах із ЧПК із високоякісної конструкційної легованої сталі 40ХМФА дозволило підвищити продуктивність виготовлення паливних брикетів за рахунок скорочення часу простоювання обладнання на ремонт та заміну робочих частин пресу ПШ-250.

Запропоноване технологічне рішення дозволило зменшити фінансові витрати підприємства на запасні частини, що своєю чергою вплинуло на вартість готової продукції.

Список літератури

1. Полянський О. С., Дьяконов О. В., Скрипник О. С., Фесенко Г. В., Д'яконов В. І., Харченко Ю. В., Волощенко В. В. *Напрями розвитку альтернативних джерел енергії: акцент на твердому біопаливі та гнучких технологіях його виготовлення*: монографія - Харків: Харківський нац. ун-т міського господарства імені О. М. Бекетова. 2017. 136 с.
2. Пат. 117937 *Гнучка технологічна лінія для виготовлення паливних брикетів* Дьяконов О. В., Дьяконов В. І., Полянський О. С., Горобець В. М., Коваленко О. І.; Україна, МПК C10L 5/40, №201701568; заявл. 20.02.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13. с.6.
3. Alwis U., Mandryk J., Hocking A. D. Dust exposures in the wood processing industry. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1999. № 60 (5). P. 641 – 647. doi: 10.1080/00028899908984485.
4. Bohadana A. B., Massin N., Wild P., Toamain J. P., Engel S., Goutet P. Symptoms, airway responsiveness, and exposure to dust in beech and oak wood workers. *Occupational and environmental medicine*, 2000, Vol. 57, pp. 268–273, doi: 10.1136/oem.57.4.268.
5. Brouwer D. H., Gijsberg H. J., Lurvink Marc W. M. Personal Exposure to Ultrafine Particles in the Workplace: Exploring Sampling Techniques and Strategies, *Annals of Occupational Hygiene*. 2004. P. 439-453. doi: 10.1093/annhyg/meh040.
6. Carton M., Goldberg M., Luce D. Occupational exposure to wood dust. Health effects and exposure limit values. *Revue d'épidémiologie et de santé publique*, 2002, № 50, P. 159 – 178.
7. Capko W. G., Sterenbogen M. Yu., Czudnowiec A. J., Papacz W. W. Aktualne problemy higieny przyprodukcji biopaliw z surowcow rolniczych za pomoca nowoczesnych technologii. *Praktyczne problemy zwiazane z ochrona pracy w rolnictwie*. 2013. P. 119 – 126.
8. de Haar C., Hassing I., Bol M., Pieters R. Ultrafine but not fine particulate matter causes airway inflammation and allergic airway sensitization to co-administered antigen in mice. *Clin Exp Allergy*. 2006. № 36. P. 1469 – 1479. doi: 10.1111/j.1365-2222.2006.02586.x.
9. Delfino R. J., Sioutas C., Malik S. Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health. *Environ Health Perspect*. 2005, Vol. 113, pp. 934 – 946, doi: 10.1289/ehp.7938.
10. Приходько І. А., Бандурин М. А., Вербицкий А. Ю. Влияние выбранных материалов и технологических параметров биомассы на брикетированную смесь. *International agricultural journal*. 2021. № 64(4).

References (transliterated)

1. Polianskyi O. S., Diakonov O. V., Skrypnyk O. S., Fesenko H. V., Diakonov V. I., Kharchenko Yu. V., Voloshchenko V. V. *Napriamy rozvytku alternatyvnykh dzherel enerhii: aktsent na tverdomu biopalyvi ta hnuchkykh tekhnolohiiakh yoho vyhotovlennia: monohrafiia* [Directions of development of alternative energy sources: emphasis on solid biofuel and flexible technologies of its production] - Kharkiv: Kharkivskyi nats. un-t miskoho hospodarstva imeni O. M. Beketova. 2017. 136 p.
2. Pat. 117937 *Hnuchka tekhnolohichna liniia dlia vyhotovlennia palyvnykh bryketiv* [Flexible technological line for the production of fuel briquettes] Diakonov O. V., Diakonov V. I., Polianskyi O. S., Horobets V. M., Kovalenko O. I.; Ukraine, MPK S10L 5/40, №201701568; zaivl. 20.02.2017; opubl. 10.07.2017, Biul. № 13. 6p.
3. Alwis U., Mandryk J., Hocking A. D. Dust exposures in the wood processing industry. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1999, Vol. 60 (5), pp. 641 – 647, doi: 10.1080/00028899908984485.
4. Bohadana A. B., Massin N., Wild P., Toamain J. P., Engel S., Goutet P. Symptoms, airway responsiveness, and exposure to dust in beech and oak wood workers. *Occupational and environmental medicine*, 2000, Vol. 57, pp. 268–273, doi: 10.1136/oem.57.4.268.
5. Brouwer D. H., Gijsberg H. J., Lurvink Marc W. M. Personal Exposure to Ultrafine Particles in the Workplace: Exploring Sampling Techniques and Strategies, *Annals of Occupational Hygiene*, 2004, pp. 439-453, doi: 10.1093/annhyg/meh040.
6. Carton M., Goldberg M., Luce D. Occupational exposure to wood dust. Health effects and exposure limit values. *Revue d'épidémiologie et de santé publique*, 2002, 50, pp. 159 – 178.
7. Capko W. G., Sterenbogen M. Yu., Czudnowiec A. J., Papacz W. W. Aktualne problemy higieny przyprodukcji biopaliw z surowcow rolniczych za pomoca nowoczesnych technologii. *Praktyczne problemy zwiazane z ochrona pracy w rolnictwie*, 2013, pp. 119 – 126.
8. de Haar C., Hassing I., Bol M., Pieters R. Ultrafine but not fine particulate matter causes airway inflammation and allergic airway sensitization to co-administered antigen in mice. *Clin Exp Allergy*, 2006, Vol. 36, pp. 1469 – 1479, doi: 10.1111/j.1365-2222.2006.02586.x.
9. Delfino R. J., Sioutas C., Malik S. Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health. *Environ Health Perspect*. 2005, Vol. 113, pp. 934 – 946, doi: 10.1289/ehp.7938.
10. Prykhodko Y. A., Bandurny M. A., Verbytskyi A. Yu. Vlyiany vybrannykh materyalov y tekhnolohycheskykh parametrov byomassy na bryketyrovannuiu smes. [Influence of selected materials and technological parameters of biomass on the briquetted mixture] *International agricultural journal*, 2021, Vol. 64(4).

Відомості про авторів (About authors)

Довгополов Андрій Юрійович – кандидат технічних наук, старший-викладач, Сумський державний університет, кафедра Технологія машинобудування верстатів та інструменти (ТМВІ), м. Суми, Україна; e-mail: d_a_y_@ukr.net

Andrii Dovhopolov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), lecturer, Sumy State University, postgraduate Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy, Ukraine; e-mail: d_a_y_@ukr.net

Некрасов Сергій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри Технологія машинобудування верстатів та інструменти (ТМВІ), м. Суми, Україна; e-mail: nekrasovss@gmail.com

Sergii Nekrasov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy, Ukraine, e-mail: nekrasovss@gmail.com

Реута Захар Анатолійович – магістрант, Сумський державний університет, кафедра Технологія машинобудування верстати та інструменти (ТМВІ), м. Суми, Україна.

Zakhar Reuta – master degree, Sumy State University, Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy, Ukraine.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Довгополов А. Ю., Некрасов С. С., Реута З. А. Забезпечення продуктивності виготовлення паливних брикетів Pini-Kay за рахунок модернізації робочої частини пресу ПШ-250. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 36-42. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.05.

Please cite this article as:

Dovhopolov A., Nekrasov S., Reuta Z. Improving the productivity of Pini-Kay fuel briquettes by modernizing the working part of the PSH-250 press. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4(10), pp. 36-42, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.05.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Довгополов А. Ю., Некрасов С. С., Реута З. А. Обеспечение производительности изготовления топливных брикетов Pini-Kay за счет модернизации рабочей части пресса ПШ-250. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 36-42. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.05.

АННОТАЦІЯ В статті проведено дослідження, пов'язані з забезпеченням продуктивності виробництва топливних брикетів типу «Pini-Kay», за рахунок модернізації робочої частини пресу лінії для виробництва топливних брикетів продуктивністю 250 кг/ч (ЛВБ-250). Відомо, що використовується прес на цій лінії – ПШ-250, являється основним робочим обладнанням даної лінії, оскільки служить для пресування брикета при температурі, і як замкнене ланка в усьому процесі брикетування. В представлено дослідженні основним критерієм продуктивності вважалося кількість виготовленої продукції до моменту поломки шлицевого шнека, оскільки поломка змушує зупинити обладнання і виробити його заміну. Це, в свою чергу, зменшує кількість виготовленої продукції. В роботі вказано, що модернізація була проведена наступним чином: шлицевий шнек, який є основним робочим органом пресу ПШ-250 виготовлений з конструкційної сталі (сталь 45) методом лиття був замінений на шлицевий шнек виготовлений методом механічної обробки на станках з ЧПУ. Матеріал цього шлицевого шнека – конструкційна легирована сталь 40ХМФА. Данна сталь використовується для виготовлення шлицевих валів, шатунов, штоків і краще всього підходить для виготовлення шлицевого шнека. Додатково для підвищення конструкційної міцності заготовки шнека була зроблена термічна обробка – нормалізація. Предложено технологічне рішення дозволило підвищити продуктивність виготовлення топливних брикетів за рахунок скорочення часу простою обладнання на ремонт і заміну робочих частин пресу ПШ-250. Це, в свою чергу, зменшило фінансові витрати підприємства на запасні частини і вплинуло на вартість готової продукції. Отримані результати показують, що запропоновані авторами шлицеві шнеки дозволили підвищити продуктивність виготовлення топливних брикетів майже в 10 разів порівняно з попередніми результатами.

Ключевые слова: топливные брикеты «Pini-Kay»; производительность; механическая обработка; пресс ПШ-250; шлицевый шнек; рабочая часть преса

Надійшла (received) 29.11.2021

УДК 621.314

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.06

ВДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУРИ ВЕКТОРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АКТИВНОГО КЕРОВАНОГО ВИПРЯМЛЯЧА

Д. С. КРИЛОВ*, О. І. ХОЛОД

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

АНОТАЦІЯ Переважна більшість електроенергії використовується об'єктами промисловості в перетвореному вигляді. Водночас інтенсивно збільшується застосування напівпровідникових перетворювачів для отримання необхідних параметрів навантаження. Сучасні тенденції розвитку та удосконалення напівпровідникових перетворювачів направлені на енергозбереження шляхом підвищення їхньої якості роботи та зменшення впливу на мережу живлення, навантаження і суміжних споживачів. Широке розповсюдження та застосування отримав частотний перетворювач зі вставкою постійного струму, схема якого переважно побудована на основі некерованого випрямляча та автономного інвертора напруги. Некеровані випрямлячі мають просту та надійну топологію, проте не дозволяють організувати рекуперацію електроенергії в мережу живлення та мають низький рівень електромагнітної сумісності. Позбавитись цих недоліків можна, якщо замінити активним випрямлячем-джерелом напруги некерований випрямляч. Робота активного випрямляча суттєво залежить від типу структури його системи керування. Тому мета роботи полягає в удосконаленні структури системи керування ключами схеми активного випрямляча – джерела напруги, що побудована з використанням векторного алгоритму розрахунку; побудові MatLab-моделі трифазного активного керованого випрямляча з удосконаленою векторною системою керування при широтно-імпульсній модуляції з фіксованою частотою та оцінці впливу на його роботу величини вхідної індуктивності. Результати моделювання підтверджують, що запропонована авторами удосконалена структура векторної системи керування забезпечує якісну роботу активного випрямляча та електромагнітну сумісність частотного перетворювача з мережею живлення на рівні допустимому стандартам; спрощення математичного апарату представлення узагальнених векторів струмів і напруг при побудові векторної системи керування активного випрямляча – джерела напруги практично ніяк не вплинуло на якісні показники роботи перетворювача; для ліквідації остаточних спотворень, що вносяться в напругу джерела додатковим навантаженням треба застосовувати фільтр мережі.

Ключові слова: електромагнітна сумісність; векторна система керування; коефіцієнт гармонійних спотворень; вхідна індуктивність; широтно-імпульсна модуляція; активний випрямляч; MatLab-модель

IMPROVEMENT OF THE VECTOR CONTROL SYSTEM STRUCTURE OF THE ACTIVE CONTROLLED RECTIFIER

D. KRYLOV, O. KHOLOD

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

ABSTRACT The vast majority of electricity is used by industrial facilities in a converted form. At the same time, the use of semiconductor converters to obtain the required load parameters is intensively increasing. Current trends in the development and improvement of semiconductor converters are aimed at energy saving by improving their quality of work and reducing the impact on the power supply, load, and related consumers. Frequency converter with DC insert has become widespread and widely used. Its scheme is mainly based on an uncontrolled diode rectifier and an autonomous voltage inverter. Uncontrolled rectifiers are simple and reliable, but have two main disadvantages: the impossibility to recover electricity to the supply network and distortions of the source current shape. We can get rid of these disadvantages by using an active rectifier made according to the voltage source scheme instead of an uncontrolled rectifier. The operation of an active rectifier significantly depends on the type of its control system structure. This article aims to improve the structure of the switches control system of the active rectifier scheme – voltage source built using a vector calculation algorithm; creation of a MatLab model of a three-phase active-controlled rectifier operating with a fixed modulation frequency and analysis of the influence of the input inductance value on the quality of its operation. The simulation results confirm that the improved structure of the vector control system proposed by the authors ensures high-quality operation of the active rectifier and electromagnetic compatibility of the frequency converter with the power supply network at the level allowed by the standards; simplification of the representation mathematical apparatus of the generalized vectors of currents and voltages at the construction of a vector control system of the active rectifier – voltage source practically did not influence qualitative indicators of the converter work in any way; a network filter must be used to eliminate the final distortions introduced into the source voltage by an additional nonlinear load.

Keywords: electromagnetic compatibility; vector control system; coefficient of harmonic distortions; input inductance; pulse width modulation; active rectifier; MatLab model

Вступ

Переважає більшість електроенергії використовується у перетвореному вигляді. Водночас

зростає застосування напівпровідникових перетворювачів для отримання необхідних параметрів навантаження. Сучасні тенденції удосконалення напівпровідникових перетворювачів направлені на

енергозбереження шляхом підвищення їхньої якості роботи та зменшення впливу на мережу живлення, навантаження і суміжних споживачів [1]. Широке розповсюдження отримав частотний перетворювач зі вставкою постійного струму [2]. Основною функцією частотного перетворювача є живлення асинхронних двигунів (АД) від промислової мережі 380 В. Схема частотних перетворювачів зі вставкою постійного струму найчастіше побудована на основі некерованого випрямляча та автономного інвертора напруги. Некеровані випрямлячі мають просту та надійну схему, але вони не мають можливості рекуперації електроенергії в мережу живлення та забезпечують низьку електромагнітну сумісність частотного перетворювача з мережею живлення [3]. Позбавитись цих недоліків можливо шляхом заміни схемою активного випрямляча-джерела напруги (АВДН) схеми некерованого випрямляча [4]. АВДН являє собою мостову схему на транзисторних ключах знакозмінного струму, яка, окрім основної функції перетворення змінної напруги в постійну, здатна забезпечити рекуперацію енергії та високу електромагнітну сумісність схеми перетворювача частоти з мережею живлення шляхом взаємодії вхідної напруги, напруги самоіндукції вхідного дроселя та вихідної напруги за алгоритмом, що залежить від обраної структури системи керування [5,6].

Мета роботи

Обраний алгоритм керування ключами схеми і коректне завдання величини індуктивності вхідного дроселя визначають ефективність роботи АВДН. Найбільш ефективною, за думкою авторів, є структура системи керування, що оперує узагальненими векторами струмів і напруг трифазної системи, які представлені в плоских або просторових координатах [7,8].

Мета даної роботи полягає у вдосконаленні структури системи керування ключами схеми АВДН, що побудована з використанням векторного алгоритму розрахунку, побудові Matlab моделі трифазного активного випрямляча з удосконаленою векторною системою керування при широтно-імпульсній модуляції з фіксованою частотою та оцінці впливу на його роботу величини вхідної індуктивності.

Виклад основного матеріалу

Структурна схема перетворювача з використанням трифазного активного випрямляча-джерела напруги наведена на рис. 1.

До схеми входить: u_s – джерело трифазної змінної напруги; T – перетворювальний трансформатор, що служить для узгодження рівнів напруги між мережею живлення та навантаженням; L_R – вхідні реактори схеми активного випрямляча; AR – активний випрямляч-джерело напруги, побудований

на основі трифазної мостової схеми з напівпровідниковими ключами знакозмінного струму; C – конденсатор у вихідному ланцюзі постійного струму АВДН; Inv – автономний інвертор напруги (АІН), який побудований на основі трифазної мостової схеми з напівпровідниковими ключами знакозмінного струму; $Load$ – трифазне навантаження, що є еквівалентною схемою асинхронного двигуна.

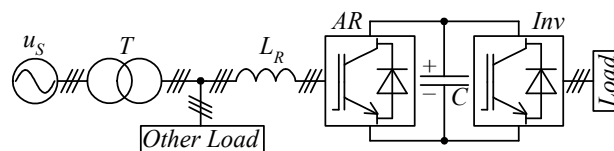


Рис. 1 – Структурна схема перетворювача з АВДН

У попередніх роботах [9–11] авторами була запропонована і детально розглянута структура системи керування АВДН, в основі якої покладено метод представлення струмів та напруг мережі у вигляді просторових векторів у системі координат pqr , що обертається, та виокремлення з їхніх проекцій складових, пропорційних прямим послідовностям трифазної системи. Вони формують сигнал завдання PWM генератора, який працює з фіксованою частотою модуляції. Ця структура дозволяє забезпечити хорошу ефективність роботи перетворювача при допустимих значеннях сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень (THD) струму та напруги мережі в точці підключення, навіть за умови поганої якості напруги джерела живлення. Така структура системи керування є універсальною. Вона підходить для різноманітної топології силової частини АВДН та може бути застосована як для трьохпровідної, так і для чотирьохпровідної системи напруг живлення, й дозволяє компенсувати, в тому числі, і струми нульової послідовності. Проте на практиці, більшість промислових приводів живиться від трифазної трьохпровідної системи напруг, а нульовий дріт не потрібен для коректної роботи схеми АВДН. Тому запропонована раніше структура є надлишковою і може бути спрощена без втрати якості роботи. За відсутності нульового дроту немає необхідності у визначенні узагальнених векторів трифазних струму та напруги у тримірній просторовій системі координат – достатньо буде двомірної, плоскої. Найбільш зручною, на думку авторів, при цьому є плоска система координат, що обертається dq [12].

Структурна схема системи керування АВДН, що побудована на її основі, наведена на рис. 2. Вона складається з 13 основних блоків, що взаємодіють між собою наступним чином:

Напруги фаз мережі живлення u_ϕ (u_a , u_b , u_c) подаються на блок перетворювача координат 1, в якому за допомогою матриці Кларка [12] перетворюються з нерухою плоскою трифазною системою координат abc в нерухому плоску двофазну систему координат $\alpha\beta$ за виразом:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}. \quad (1)$$

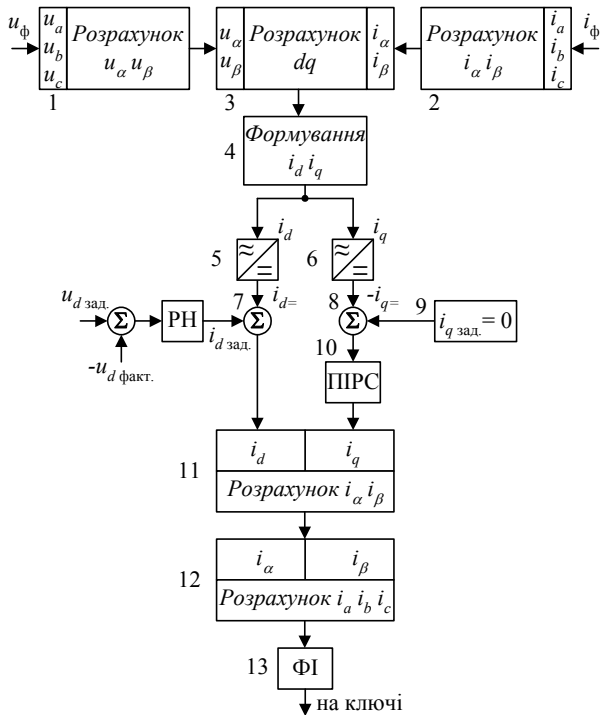


Рис. 2 – Система керування АВДН

Аналогічно в блоці 2 відбувається перетворення фазних струмів i_ϕ (i_a, i_b, i_c) джерела живлення з координат abc в координати $\alpha\beta$ за виразом:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

У блоці 3 відбувається перетворення струмів і напруг з плоскої нерухокої двофазної системи координат $\alpha\beta$ в плоску двофазну систему координат, що обертається, dq . Зазвичай для цього використовують матрицю Парка [12], яка для фазних струмів джерела живлення, виглядає як

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де θ – поточне значення кута повороту узагальненого вектора напруги джерела живлення відносно осі α . Його визначають з виразу:

$$\theta = \arctg\left(\frac{u_\alpha}{u_\beta}\right). \quad (4)$$

З (4) видно, що якщо напруги мережі живлення симетричні та синусоїдальні, кут рівномірно збільшується в функції часу. Якщо напруга мережі спотворена, похідна кута θ ($d\theta/dt$) змінюється у часі.

Необхідність обчислення тригонометричної функції арктангенса при визначенні кута θ накладає підвищені вимоги до мікропроцесорного комплексу системи управління АВДН, знижуючи його швидкодію. Тому при формуванні сигналів фазних струмів джерела в координатах dq бажано було б такі перетворення виключити.

Розглядаючи положення узагальненого вектора напруги, що обертається в координатній площині $\alpha\beta$ [12], отримаємо вираз визначення проєкцій узагальненого вектора струму мережі на осі dq через координати узагальненого вектора напруги мережі в системі $\alpha\beta$ в наступному вигляді:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Отже, для підвищення ефективності роботи реальної системи керування, доцільно використовувати вираз (5) замість (3), що було реалізовано авторами у структурі, наведеній на рис. 2.

У блоці 4 формуються сигнали завдання струму фази i_d, i_q , які подаються на блоки 5 та 6, що відсікають від них змінну складову, залишаючи лише постійну. Постійні складові проєкцій узагальненого вектора струму мережі на осі dq , $i_{d=}$ та $i_{q=}$, надходять на суматори 7 і 8, де порівнюються із заданими значеннями струмів у цих координатах $i_{d\text{ зад.}}$, $i_{q\text{ зад.}}$.

Нульове значення постійної складової проєкції узагальненого вектора струму на координату q свідчить про наявність фазового зсуву між струмом і напругою джерела, що, зазвичай, є небажаним. Тому величину $i_{q\text{ зад.}}$ в блоці 9 приймають рівною нулю, а сигнал неузгодження між поточним значенням і завданням по координаті q подають на пропорційно-інтегральний регулятор 10. Таким чином, досягається повна компенсація реактивної потужності на стороні мережі АВДН. Варто зазначити, що величину $i_{q\text{ зад.}}$ можна прийняти відмінною від нуля, формуючи необхідну величину та знак реактивної потужності на вході АВДН.

Єдино корисною є постійна складова проєкції узагальненого вектора струму на координату d $i_{d=}$. Вона відповідає за процес передачі активної потужності від джерела до навантаження або навпаки. Однак, у ній має міститись складова, необхідна для підтримки постійної напруги на конденсаторі ланки постійного струму АВДН. Тому завдання струму по координаті d $i_{d\text{ зад.}}$, що формується виходом регулятора напруги конденсатора, підсумовується з $i_{d=}$.

Сформовані таким чином сигнали завдання струму мережі в координатах dq подаються на блоки зворотних перетворень координат. У блоці 11 відбувається перетворення з координат dq в $\alpha\beta$ відповідно до матричного виразу, що є зворотнім виразу (5):

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} \begin{bmatrix} u_\alpha & -u_\beta \\ u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Формування сигналів завдання струму мережі в координатах abc відбувається в блоці 12 відповідно до виразу для зворотного перетворення Кларка

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

Далі сигнали завдання подаються на блок формування імпульсів 13, в основі якого ШІМ генератор, що працює з фіксованою частотою модуляції, а потім надходять на ключі АВДН.

Аналіз діапазону можливих значень вхідної індуктивності схеми АВДН по структурі рис. 1 було запропоновано авторами в [11]. Оскільки метою даної статті є перевірка ефективності, наведеної на рис. 2 структури системи керування АВДН при тих самих параметрах силової схеми, значення номіналів елементів, конфігурація джерела живлення та додаткового навантаження залишаються такими ж, як і в [11]. Для коректності порівняння результатів, в моделі перетворювача змінимо лише блок системи керування.

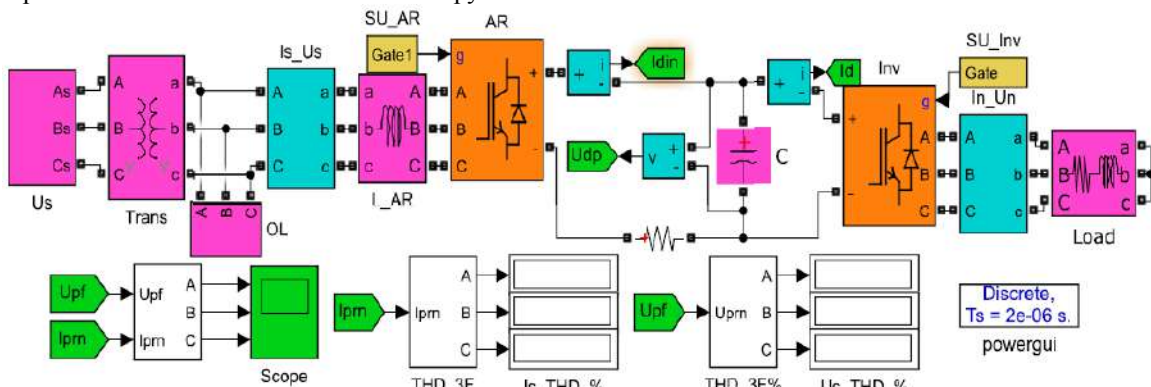


Рис. 3 – MatLab-модель схеми перетворювача з АВДН

На базі запропонованої моделі з удосконаленою системою керування по структурі рис. 2 було аналогічно [11] проведено дослідження, як від величини вхідної індуктивності АВДН залежать в точці підключення перетворювача THD_U та THD_I - сумарні коефіцієнти гармонійних спотворень фазних напруг та струмів мережі. Віртуальні експерименти здійснювалися для двох випадків: відключеного та підключеного додаткового навантаження паралельно на затискачі джерела живлення. Результати експерименту представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати експерименту

$THD, \%$	Індуктивність вхідного реактора, мкГн								
	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Відключене додаткове навантаження									
THD_I	7,42	4,14	2,91	2,25	1,85	1,60	1,48	1,48	1,47
THD_U	18,05	10,26	7,14	5,45	4,39	3,65	3,10	2,68	2,34
Підключене додаткове навантаження									
THD_I	7,60	4,34	3,21	2,64	2,29	2,07	1,96	2,02	2,13
THD_U	19,47	12,80	10,61	9,63	9,11	8,80	8,61	8,48	8,37

Обговорення результатів

MatLab модель схеми частотного перетворювача з АВДН зображена на рис. 3. Вона побудована на основі структури рис. 1 і має наступні параметри: трифазне джерело живлення з потужністю короткого замикання 150 МВА і діючим значенням лінійної напруги 6 кВ; перетворювальний трансформатор потужністю 1 МВА та напругою 6 кВ/0,4 кВ; додаткове навантаження – тиристорний керований випрямляч потужністю 300 кВт; силові схеми АВДН і АІН, що працюють з фіксованою на рівні 4 кГц частотою модуляції при синусоїдальній ШІМ. Ємність ланки постійного струму обрано рівною 28 мФ. RL - еквівалентне навантаження, що моделює статорний ланцюг асинхронного двигуна потужністю 315 кВт. Система керування АВДН відповідає структурі рис. 2. Система керування АІН реалізована по замкнутому принципу та підтримує значення активної потужності навантаження на рівні 315 кВт для усіх режимів роботи схеми.

Діапазон зміни величини індуктивності вхідних реакторів АВДН обрано рівним 100-900 мкГн [11].

Порівнюючи данні табл. 1 з аналогічними, отриманими в [11] бачимо, що вони практично ідентичні. Таким чином, можна зробити висновок, що суттєве спрощення структури системи керування ніяк не вплинуло на якісні показники роботи АВДН і прийняте припущення про надмірність представлення узагальнених векторів струмів і напруг в просторовій системі координат $p-q-r$ є вірним.

На базі отриманих експериментальних даних (табл. 1.) побудовано діаграмами рис. 4, на яких представлені залежності THD_U і THD_I мережі живлення в точці підключення напівпровідникового перетворювача від величини вхідної індуктивності.

Машинограми, які ілюструють роботу активного випрямляча без і з підключенням додаткового навантаження паралельно затискачам мережі аналогічні наведеним в дослідженні [11].

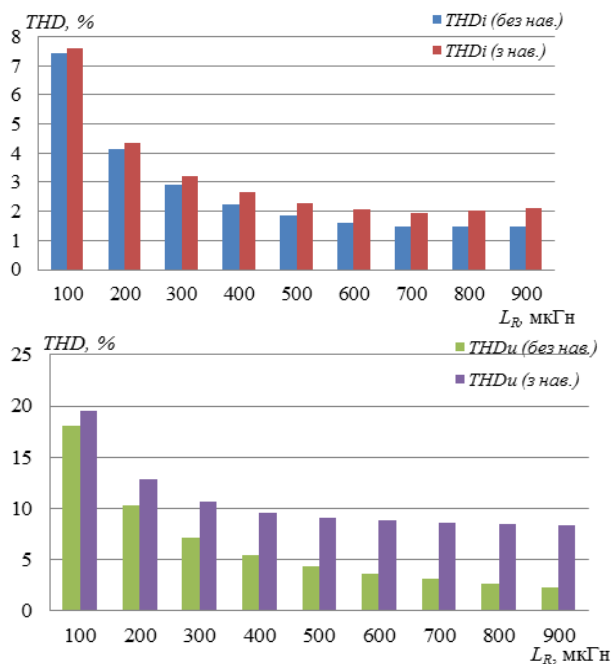


Рис. 4 – Графічні залежності THD від величини додаткової вхідної індуктивності

Висновки

Побудова Matlab моделі трифазного активного випрямляча з удосконаленою структурою системи керування як частини частотного перетворювача та дослідження її роботи дозволяє зробити висновки:

- запропонована авторами удосконалена структура векторної системи керування забезпечує якісну роботу активного випрямляча та електромагнітну сумісність частотного перетворювача з мережею живлення на рівні допустимому стандартам;

- спрощення математичного апарату представлення узагальнених векторів струмів і напруг при побудові векторної системи керування АВДН практично ніяк не вплинуло на якісні показники роботи перетворювача;

- застосування просторової системи координат $p-q-r$ при побудові векторної системи керування АВДН, що живиться від мережі без нульового дроту, є надмірним;

- для ліквідації остаточних спотворень, що вносяться в напругу джерела додатковим нелінійним навантаженням треба застосувати фільтр мережі.

Список літератури

1. Шевченко І. С., Морозов Д. І., Белоха Г. С. «Пряме» векторне управління асинхронною машиною подвійного живлення. *Вісник Східноукраїнського Національного Університету імені Володимира Даля*. 2021. Вип. 8(264), С. 62–65. doi:10.33216/1998-7927-2020-264-8-62-65.
2. Yiyuan Bie, Yang Li, Guoqing He, Xing Zhang. PWM rectifier impedance modelling and analysis. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 675(1). P. 1–7. doi:10.1088/1755-1315/675/1/012064.

3. Wang P., Li H., Cao T., Wang X. Proof of Equivalence Between Two Interlaced Two-level PWM Rectifiers and Three-level PWM Rectifiers. *Tiedao Xuebao. Journal of the China Railway Society*. 2019. Vol. 41(1). P. 59–64. doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2019.01.008.
4. Zhang B., Qiu D. *m-Mode SVPWM for PWM Rectifier*. In: *m-Mode SVPWM Technique for Power Converters. CPSS Power Electronics Series*. Springer. 2019. P. 169–189. doi:10.1007/978-981-13-1382-0_9.
5. Xudong Liu. Subway Traction Power Supply System Based on PWM Rectifier. *Journal of Physics*. 2021. Vol. 2136(1). P. 1–5. doi:10.1088/1742-6596/2136/1/012019.
6. Attaianes C., Tomasso G. Optimized modulation for PWM rectifiers. *IEEE. Power Engineering Society Winter Meeting*. 2002. Vol. 2. doi:10.1109/PESW.2002.985219.
7. Wang B., Tang Y. Research on Fuzzy Control of PWM Rectifier Voltage. *3rd International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE)*. 2020. doi:10.1109/AEMCSE.50948.2020.00174.
8. Teixeira R.D.A., Silva W.L.A., Pessoa G.A.P.D.C.A., Neto J.T.C., Villarreal E.R.L., Salazar A.O. Lock A.S. One Cycle Control of a PWM Rectifier a New Approach. *Energies*. 2020. Vol. 13. № 5523. P. 1–25. doi:10.3390/en13205523.
9. Krylov D., Kholod O., Radohuz S. Active rectifier with different control system types. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. 2020. P. 273–278. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263226.
10. Krylov D. S., Kholod O. I. The efficiency of the active controlled rectifier operation in the mains voltage distortion mode. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. № 2. P. 30–35. doi: 10.20998/2074-272X.2021.2.05.
11. Крилов Д. С. Холод О. І. Вплив величини вхідної індуктивності на якісні показники роботи активного керованого випрямляча. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2021. № 1 (7). С. 18–23. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.03.
12. Жемеров Г. Г., Тугай Д. В. *Перетворення координат загальних векторів напруг і струмів трифазної системи електропостачання*. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 200 с.

References (transliterated)

1. Shevchenko I. S., Morozov D. I., Belokha G. S. «Priame» vektorne upravlinnia asynkronnoiu mashynoiu podviinoho zhyvlenia. [“Direct” vector control of asynchronous dual power machine]. *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 2021, Vol. 8 (264), pp. 62–65, doi: 10.33216/1998-7927-2020-264-8-62-65.
2. Yiyuan Bie, Yang Li, Guoqing He, Xing Zhang. PWM rectifier impedance modelling and analysis. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021, Vol. 675(1), pp. 1–7, doi:10.1088/1755-1315/675/1/012064.
3. Wang P., Li H., Cao T., Wang X. Proof of Equivalence Between Two Interlaced Two-level PWM Rectifiers and Three-level PWM Rectifiers. *Tiedao Xuebao. Journal of the China Railway Society*, 2019, Vol. 41(1), pp. 59–64, doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2019.01.008.
4. Zhang B., Qiu D. *m-Mode SVPWM for PWM Rectifier*. In: *m-Mode SVPWM Technique for Power Converters. CPSS Power Electronics Series*, Springer, 2019, pp. 169–189, doi:10.1007/978-981-13-1382-0_9.
5. Xudong Liu. Subway Traction Power Supply System Based on PWM Rectifier. *Journal of Physics*, 2021, Vol. 2136(1), pp. 1–5, doi:10.1088/1742-6596/2136/1/012019.

6. Attaianese C., Tomasso G. Optimized modulation for PWM rectifiers. *IEEE. Power Engineering Society Winter Meeting*, 2002, Vol. 2, doi:10.1109/PESW.2002.985219.
7. Wang B., Tang Y. Research on Fuzzy Control of PWM Rectifier Voltage. *3rd International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE)*, 2020, doi:10.1109/AEMCSE.50948.2020.00174.
8. Teixeira R.D.A., Silva W.L.A., Pessoa G.A.P.D.C.A., Neto J.T.C., Villarreal E.R.L., Salazar A.O., Lock A.S. One Cycle Control of a PWM Rectifier a New Approach. *Energies*, 2020, Vol. 13 (5523), pp. 1–25, doi:10.3390/en13205523.
9. Krylov D., Kholod O., Radohuz S. Active rectifier with different control system types. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2020, pp. 273–278, doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263226.
10. Krylov D. S., Kholod O. I. The efficiency of the active controlled rectifier operation in the mains voltage distortion mode. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 2, pp. 30–35, doi: 10.20998/2074-272X.2021.2.05.
11. Krylov D., Kholod O. The value influence of the input inductance on the qualitative indicators of the active rectifier operation. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, 2021, no. 1 (7), pp. 18–23, doi: 10.20998/2413-4295.2021.01.03.
12. Zhemerov G. G., Tugay D. V. *Peretvorennia koordynat zahalnykh vektoriv napruh i strumiv tryfaznoi systemy elektropostachannia* [Reconstruction of coordinates of backward vectors along the lines and structures of the three-phase system and electrical power supply]. Kharkiv: KhNUUE nam. O. M. Beketova, 2019, 200 p.

Відомості про авторів (About authors)

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

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

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

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

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Крылов Д. С., Холод О. І. Вдосконалення структури векторної системи керування активного керованого випрямляча. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 43-48. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.06.

Please cite this article as:

Krylov D., Kholod O. Improving of the vector control system structure of the active controlled rectifier. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4(10), pp. 43-48, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.06.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Крылов Д. С., Холод О. И. Усовершенствование структуры векторной системы управления активного управляемого выпрямителя. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 43-48. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.06.

АННОТАЦІЯ Подавляющая часть электроэнергии потребляется в преобразованном виде. В то же время увеличивается использование полупроводниковых преобразователей для получения требуемых параметров нагрузки. Современные тенденции в совершенствовании полупроводниковых преобразователей направлены на энергосбережение за счет повышения качества их работы и снижения воздействия на питающую сеть, нагрузку и смежных потребителей. Широкое распространение получили преобразователи частоты со вставкой постоянного тока, схема которых формируется на основе неуправляемого выпрямителя и автономного инвертора напряжения. Неуправляемые выпрямители просты и надежны, но имеют два недостатка: невозможность рекуперации энергии в сеть и низкий уровень совместимости с питающей сетью. Избавиться от этих недостатков можно, если вместо неуправляемого выпрямителя использовать активный выпрямитель - источника напряжения. Целью данной статьи является усовершенствование структуры системы управления ключами схемы активного выпрямителя - источника напряжения, построенного с использованием векторного алгоритма расчета; построение Matlab модели трехфазного активного выпрямительного с усовершенствованной структурой системы управления и оценка влияния величины входной индуктивности на показатели его работы. По результатам моделирования стало очевидно, что: предложенная структура системы управления обеспечивает стабильную работу преобразователя и приемлемую электромагнитную совместимость с сетью при фиксированной частоте модуляции; упрощение математического аппарата представления обобщенных векторов токов и напряжений при построении векторной системы управления активным выпрямителем никак не повлияло на качественные показатели работы преобразователя; необходимо использовать сетевой фильтр для устранения искажений, вносимых в напряжение источника дополнительной нагрузкой.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость; векторная система управления; коэффициент гармонических искажений; входная индуктивность; широтно-импульсная модуляция; активный выпрямитель; MatLab-модель

Надійшла (received) 22.11.2021

УДК 62-578.001.5

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.07

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ПРИВОДУ ЗДВОЄНОГО ЗЧЕПЛЕННЯ ЗІ ЗМЕНШЕНИМИ ЕНЕРГОВИТРАТАМИ НА КЕРУВАННЯ

**М. Є. СЕРГІЄНКО^{1*}, П. М. КАЛІНІН⁵, М. І. ГАСАНОВ², Н. М. ПАВЛОВА³, В. С. СВДЛО¹,
А. О. ОКУНЬ⁴**

¹кафедра автомобіле- і тракторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

²кафедра технології машинобудування та металорізальні верстати, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

³кафедра інформаційних вимірjувальних технологій і систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

⁴кафедра комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

⁵кафедра інженерної механіки, Національна академія Національної гвардії України, м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: nesergienko@gmail.com

АНОТАЦІЯ Світова тенденція покращення трансмісії транспортних та тягових засобів пов'язана з використанням роботизованих преселективних коробок переключення передач, важливим вузлом якої є фрикційне зчеплення. Проведений огляд існуючих конструкцій та аналіз концепцій розвитку зчеплень дозволяє визначитись з напрямками їх вдосконалення, зокрема, вдосконаленням сухих здвоєних зчеплень, що є предметом дослідження у даній роботі. Істотним недоліком існуючих конструкцій здвоєних зчеплень є використання додаткових спеціальних (переважно гідравлічних або комбінованих) систем для включення-виключення в роботу фрикційних пар, що збільшує вартість конструкції, витрати енергії на керування та ускладнює конструкцію, обслуговування та ремонт. Запропонована конструкція приводу керування оригінального сухого здвоєного зчеплення передбачає використання важільного механізму із застосуванням поворотних упорів, які виконані у вигляді пересувних кареток з роликками, що забезпечує перемикання зчеплень за короткий час та практично без розриву потоку потужності і, відповідно, покращує динаміку розгону транспортних засобів, спрощує конструкцію зчеплення та зменшує енерговитрати на його керування як в процесі початку руху машини, так і при переключенні передач. Розроблено математичну модель запропонованого приводу зчеплення, на основі якої змодельовано роботу механізму керування і проаналізовано вплив його окремих конструктивних параметрів на якісні показники роботи приводу зчеплення, зокрема, на кінематичні характеристики приводу, діапазони кінематичних та силових передаточних чисел приводу, силову взаємодію ланок механізму, потужність виконуючого пристрою при включенні кожного зчеплення. Встановлено, що на перемикання зчеплень потрібні менші енерговитрати, що переміщення елементів механізму неоднакове, а сила стиснення фрикційних пар при включенні першого і другого зчеплень відрізняються. З результатами моделювання підтверджено, що запропонована оригінальна важільна конструкція механізму керування зчепленнями є ефективною. Отримані результати дозволяють обґрунтовано визначати параметри зчеплення, проте вибір оптимально-раціональних параметрів механізму його керування потребує проведення подальших досліджень, для проведення яких розроблено відповідні методика, алгоритм пошуку та їх програмна реалізація.

Ключові слова: сухе здвоєне зчеплення; привод керування; важільний механізм, кінематична пара, передаточне число; кінематичні параметри; силовий розрахунок; математична модель; транспортний засіб

ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF THE DOUBLE CLUTCH DRIVE WITH REDUCED CONTROL ENERGY CONSUMPTION

N. SERGIENKO^{1*}, P. KALININ⁵, M. GASANOV², N. PAVLOVA³, V. SVIDLO¹, A. OKUN⁴

¹ Department of Automotive and Tractor Engineering, National Technical University "Kharkov Polytechnic University", Kharkov, UKRAINE

² Department of Mechanical Engineering Technology and Metal-Cutting Machines, National Technical University "Kharkov Polytechnic University" Kharkov, UKRAINE

³ Department of Information and Measurement Technologies and Systems National Technical University "Kharkov Polytechnic University", Kharkov, UKRAINE

⁴ Department of Computer Modeling and Integrated Forming Technologies, National Technical University "Kharkov Polytechnic University", Kharkov, UKRAINE

⁵ Department of Engineering Mechanics, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT The global trend of improving vehicle and traction transmissions is associated with the use of robotic preselector gearboxes, an important component of which is the friction clutch. The review of existing designs and analysis of clutch development concepts allows determining the directions of their improvement, in particular, the improvement of dry double clutches, which is the subject of research in this paper. A significant disadvantage of existing dual-clutch designs is the use of additional special (mostly hydraulic or combined) systems for on-off friction pairs, so the structural cost and energy costs for control are increased, and the

design, maintenance, and repair are complicated. The proposed design of the drive to control the original dry dual-clutch involves a lever mechanism with the use of rotary stops, which are made in the form of mobile carriages with rollers, this provides switching clutches in a short time and actually without interruption of power flow, so the acceleration dynamics of vehicles will be improved, the clutch design will be simplified and energy consumption for its control during the start and gear shifting will be reduced. The mathematical model of the proposed clutch drive on the basis of which the control mechanism operation is simulated and influence of its design parameters on operational indicators of the clutch drive, in particular, on kinematic characteristics of the drive, ranges of kinematic and power gear ratios, the power interaction of the mechanism links, the power of the actuator when each clutch is turning on. It is established that the switching of clutches requires less energy, the movement of the mechanism elements is different, and the compression force of the friction pairs when starting the first and second clutches is different. The simulation results confirm that the proposed original lever design of the clutch control mechanism is effective. The obtained results allow us to reasonably determine the parameters of a clutch, but the choice of optimal-rational parameters of its control mechanism requires further research, for which appropriate methods, search algorithms, and their software implementation have been developed.

Keywords: dry double clutch; control drive; lever mechanism, kinematic pair, gear ratio; kinematic parameters; power calculation; mathematical model; vehicle

Вступ

Параметри і характеристики системи управління автомобілем впливають на безпеку руху, витрати енергії силового агрегату та водія, показники роботи автомобіля. Одним з важливих об'єктів управління трансмісії є зчеплення, на привід якого витрачається частина енергії водія, двигуна, як при русанні з місця, так і в процесі руху транспортного засобу при перемиканні передач.

Привід зчеплення призначений для здійснення зв'язку між виконуючим механізмом і натискним підшипником зчеплення. З розвитком конструкцій зчеплень з'являється необхідність розробки нових, модернізації і автоматизації їх приводів, тому що необхідно забезпечення надійної передачі моменту двигуна, оптимального алгоритму процесу включення-виключення зчеплення та зменшення витрат енергії на його управління. Сьогодні сучасними такими зчепленнями є здвоєні зчеплення, які працюють без розриву потоку потужності або перемикають зчеплення з високою швидкістю. Діючі автоматичні приводи таких зчеплень відрізняються від класичних, тим що вони працюють з непостійно замкнутими зчепленнями і вимагають постійної витрати енергії ДВЗ як при переключенні так і для підтриманні у замкнутому положенні одного з включених зчеплень. З появою нових варіантів конструкцій сухих здвоєних зчеплень змінюється алгоритм роботи приводу, витрати енергії, кінематика руху елементів та їх навантаженість. Розповсюдження сьогодні сухих здвоєних зчеплень пов'язано з їх перевагами по вартості виготовлення та по витратах при експлуатації та ремонті.

У трансмісії зі здвоєним зчепленням процеси розмикання одного зчеплення і замикання другого відбуваються за скорочений час, а можливо з «перекриттям» у часі. Таким чином, забезпечується перемикання передач практично без розриву потоку потужності, що дозволяє значно скоротити час перемикання передач, покращити динаміку розгону машини, зменшити витрату палива, викиди шкідливих речовин в навколишнє середовище.

Коробка передач і здвоєне зчеплення управляється мехатронною системою, яка включає в себе блок автоматичного управління, датчики,

виконавчі механізми гідравлічного, електричного або комбінованого типу. Ефективність автоматичного управління визначається ступенем узгодженості алгоритму роботи блоку управління через дію приводних механізмів, що здійснюють процес перемикання зчеплень та передач з вихідними показниками ДВЗ та управляючої дією водія. Мехатронна система отримує сигнали, що надходять з датчиків частоти обертання колінчастого валу і вхідних валів коробки передач, датчиків числа обертів коліс автомобіля, положення педалі акселератора та ін., і діє по заданому алгоритму. Система управління на підставі отриманих даних приймає рішення про необхідність переключення зчеплень і відповідних передач коробки та включає в роботу механізми привода здвоєного зчеплення, які починають включати одне зчеплення і вимикати інше, та ступені коробки передач.

Правильно побудований алгоритм управління подвійним зчепленням дозволяє знизити динамічні навантаження в трансмісії автомобіля і, відповідно, істотно впливає на навантаженість і довговічність деталей трансмісії.

Актуальність дослідження кінематики та навантаження елементів приводу в процесі переключення зчеплень приводу здвоєного зчеплення дозволяє визначити показники взаємодії елементів приводу, витрати енергії на управління, підготувати дані для аналізу роботи і підготовки вимог для приводів нового зчеплення, а при необхідності і оптимізації роботи приводу, щоб в повному обсязі забезпечити переваги сухих здвоєних зчеплень – висока швидкість переключення зчеплень, малі витрати енергії на управління, експлуатації та надійна передача моменту ДВЗ без розриву потоку потужності або скороченим розривом в момент зміни передачі.

Мета роботи

Метою даного дослідження є кінематичний та силовий аналіз приводу керування сухим здвоєним зчепленням зі зменшеними витратами енергії на його управління.

Аналіз літератури

На сьогодні в літературі недостатньо представлено інформації по обґрунтуванню та аналізу схем приводу здвоєного зчеплення зі зменшеними витратами енергії на управління, по особливостям показників і можливостям його роботи, вибору типу і параметрів елементів приводу та виконуючого механізму.

До приводу зчеплення висуваються наступні вимоги: зручність і легкість управління, високий ККД, забезпечення необхідного алгоритму керування, мінімальні втрати енергії на управління, стежача дія, наявність зворотного зв'язку, безвідмовність і довговічність, простота конструкції, незначні витрати при обслуговуванні та ремонті.

Побудова схеми базується на аналізі приводів однопоточних зчеплень. У дослідженні однопоточних постійно замкнутих зчеплень [1,2] розглянуті основні схеми приводів, у яких значна частина енергії витрачається при включенні та виключенні зчеплення, та застосуванням для управління зчепленнями підсилювачів, які передають великий крутний момент ДВЗ. Авторами роботи [3] проаналізовано витрати енергії на управління приводом здвоєного зчеплення та порівняно їх конструкцію з конструкцією оригінального здвоєного

зчеплення зі зменшеними витратами на управління [4], ескіз якого представлено на рис. 1 та обрано у якості об'єкта дослідження у представленій роботі.

У роботі [5] розглянута кінематика та рівняння руху приводу електромеханічного зчеплення, які описують динаміку його роботи.

Для вирішення проблеми, пов'язаної з постійною витратою енергії на привід управління зчепленням у переважній більшості існуючих здвоєних зчеплень, розроблено зчеплення і схема його приводу, яка потребує витрати енергії лише в момент трогання машини та перемикання передач. Порівнюючи представлене зчеплення з досить розповсюдженим здвоєним зчепленням концерну Volkswagen, а саме з сухим здвоєним зчепленням, оскільки воно найбільш відповідає сучасним підходам у конструюванні за рахунок більшої ефективності та простоти конструкції порівняно зі здвоєним мокрим зчепленням [6]. В даному зчепленні за включення кожного зчеплення відповідає свій натискний диск та свій виконавчий механізм. Особливістю приводу є те, що на кожне зчеплення використовується окремий механізм і виконуючий пристрій - гідроциліндр зв'язаний гідромагістралями через розподільник з насосом. Зусилля передаються через відповідні важелі, які виконані пружними.

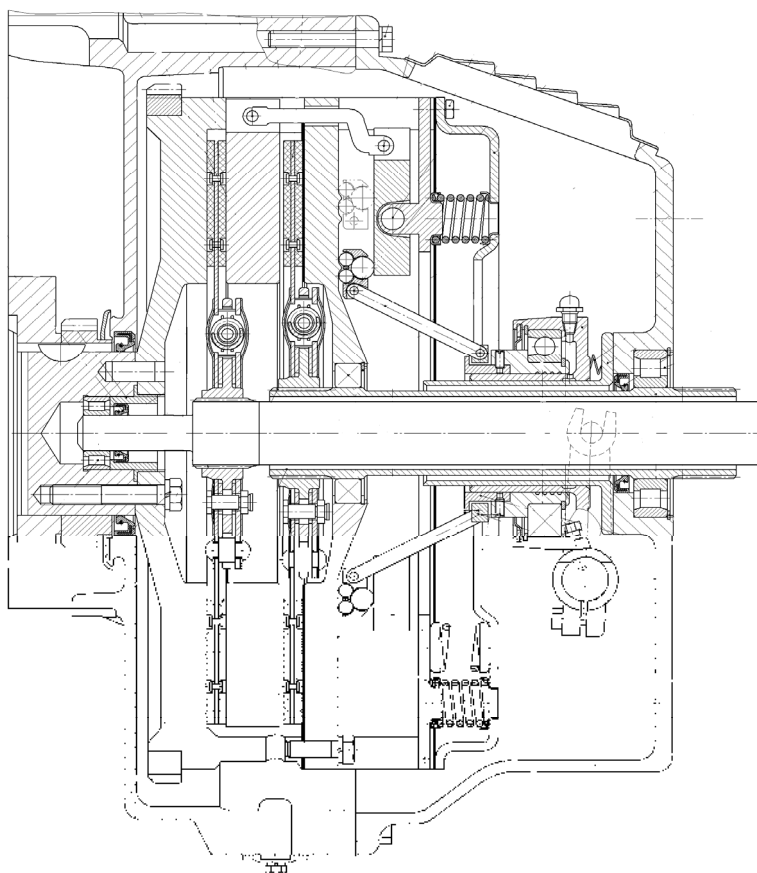


Рис. 1 – Оригінальне здвоєне зчеплення

Дослідження процесів роботи сухого фрикційного подвійного зчеплення, перемикання передач в трансмісії автомобіля наведені в роботах [7-9]. У них викладено методіку дослідження статичної рівноваги в механізмі сухого фрикційного зведеного зчеплення, що дозволяє отримати його навантажувальну характеристику, а також враховувати взаємний вплив зчеплень один на одного. В якості критеріїв для визначення оптимальних параметрів налаштування системи управління подвійним зчепленням служать максимально можливе скорочення часу перемикання передач при розгоні автомобіля і мінімальна сумарна робота буксування обох зчеплень. Результати досліджень доведені до практичної реалізації у вигляді пакету розрахункових прикладних програм та інженерних рекомендацій, призначених для вирішення завдань конструювання, оптимізації та аналізу мехатронних систем управління зведеним зчепленням, перемикання передач в трансмісії з подвійним зчепленням. У роботі [10] виконані дослідження щодо вдосконалення процесу керування пневмогідролічним підсилювачем привода зчеплення, що дозволило встановити раціональну модель та алгоритм роботи зчеплення.

Питанням процесу перемикання передач фрикційними муфтами в трансмісіях колісних і гусеничних машин присвячено досить велика кількість робіт, зокрема [9-12], в яких проводиться аналіз процесу переключення передач, як з розривом потоку потужності, так і без розриву. В роботі [13] розглянуто теоретичні основи систем керування зчепленням транспортних засобів з механічною трансмісією. Моделюється комплексно система «автомобіль-водій», включаючи варіанти приводу управління зчепленням, трансмісією, водієм. Але у вказаних роботах не достатньо уваги приділено аналізу кінематики та навантаженості приводу зведеного зчеплення зі зменшеними витратами енергії на керування.

Питання управління зчепленням актуальні не тільки для автомобілів, но і для тракторів [14-17]. При роботі з великим тяговим навантаженням вимоги до системи управління зростають.

Розглянуті автомобільні зчеплення та приводи в роботі [18] потребують пристосування для обраного варіанту конструкції. Для цього були виконані роботи [18-21], які відображають конструкцію та систему керування.

Концепцію будови та удосконалення механізму управління зведеним зчепленням зі зменшеними витратами енергії на керування треба розробляти також з використанням результатів робіт [22-24].

Кінематичний аналіз приводу

Для обраного зчеплення є можливість вибору місця розміщення механізму для впливу на натискний диск зчеплення з метою стиснення фрикційних пар. Можна розмістити виконуючий пристрій

безпосередньо у картері зчеплення для спрощення конструкції приводу. У такому разі виникає необхідність подолання значного зусилля та забезпечення необхідної слідкуючої дії, чутливості виконуючого механізму при регулюванні моменту фрикційних пар зчеплень при малому ході виконуючого механізму. Оскільки у зведених зчепленнях зазор у фрикційних парах складає 0,8-1мм, то виникають певні труднощі. При цьому необхідно втиснути привід в обмежений простір і фактично виключити можливість аварійного ручного керування. Інший же варіант – використання комбінованого приводу зчеплення з вибором оптимального передаточного числа. Така схема забезпечує зменшення зусиль на виконуючому пристрою і збільшення ходу вхідного елемента, що передає зусилля на механізм приводу, та забезпечує плавність включення зчеплень та слідкуючу дію механізму. Привід складається з виконуючого пристрою (пнеumo- чи гідроциліндра, електродвигуна або комбінований тощо), важелів механізму привода зчеплення, вилки включення/виключення зчеплень, натискного підшипника, важелів, які з'єднують зовнішню опору натискного підшипника і пересувної каретки. Пересувна каретка, яка переміщується по опорному диску, та важелів, які передають зусилля натискного диску. На рис. 2 представлено кінематичну схему механізму приводу зведеного оригінального зчеплення.

В новому зведеному зчепленні досягається зменшення втрат енергії на керування за рахунок зменшенню опору руху механізму приводу, кардинально іншої кінематики, створення зусиль на натискному диску зчеплення та роботи лише в момент перемикання зчеплень. При включенні, перемиканні зчеплень долаються сили опору коченню кареток, які навантажені натискними пружинами, замість подолання зусиль натискних пружин.

Особливістю вибраної схеми зведеного зчеплення є механізм, за допомогою якого відбувається почергове включення зчеплень. Процес включення/виключення двох зчеплень відбувається одним виконуючим пристроєм. Виконуючий пристрій в момент необхідності включення одного з зчеплень діє на привід зчеплення, потім на натискний підшипник, натискний підшипник, у свою чергу, розрахований на передачу зусилля в двох напрямках, оскільки йому необхідно переміщувати каретку почергово у положення включення першого та другого зчеплень, пересувна каретка змінює своє положення під впливом важеля від підшипника. У зчепленні встановлюється радіально мінімум три каретки. Вони знаходяться у піджатому положенні між опорним диском (в якому є виступи, які допомагають фіксації каретки у необхідних положеннях) та натискною пластиною, яка притискається периферійно розташованими циліндричними пружинами. При зміні положення каретки поворотний важіль під впливом сил від

пружин змінює кут нахилу та через поздовжні важелі діє на натискний диск, який стискає фрикційні пари першого зчеплення. При необхідності включення другого зчеплення виконуючий пристрій впливає на привід зчеплення у зворотному напрямку і тим самим переміщує каретку і змінює напрям і кут нахилу поворотного важеля у відповідне положення натискного диску – стиснення фрикційних пар другого зчеплення. Дана особливість є основною перевагою, завдяки оригінальній будові приводу він не витрачає енергію на подолання опору натискних пружин, а витрачає значно менше енергії на подолання опору кочення каретки при переключенні і виключенню/включенню зчеплень.

Розроблене зчеплення відрізняється приводом переміщення натискного диска, привід конструктивно

простіший за рахунок одного керуючого елемента. Відповідно для включення одного з зчеплень необхідно одноразово задіяти виконуючий механізм, далі роботу по притисненню дисків до робочої поверхні виконують натискні пружини. При необхідності переходу на наступне зчеплення в роботу знову вступає виконуючий механізм. Для переміщення каретки у положення включення другого зчеплення долаючи опір кочення кареток привід діє аналогічно і забезпечує стиснення фрикційних дисків від натискних пружини. Далі виконуючий механізм залишається вимкненим до наступного переключення.

Перевагою запропонованої конструкції є простота виконання - за рахунок одного механізму включення і виключення кожного з двох зчеплень.

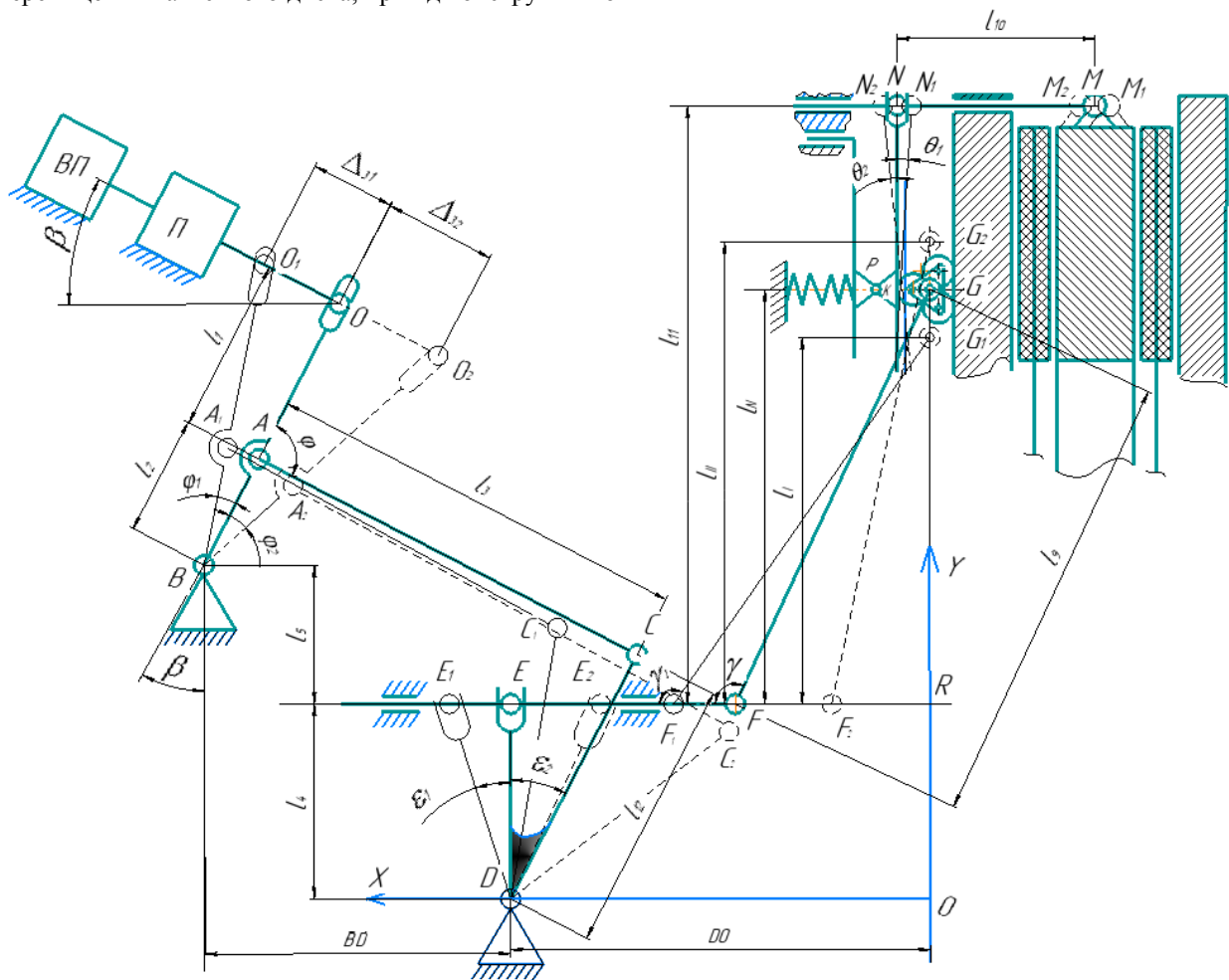


Рис. 2 – Кінематична схема механізму приводу оригінального зведеного зчеплення

Привід зведеного зчеплення потребує досліджень зчеплення і перевірку забезпечення однакових умов роботи першого та другого зчеплень.

На рис. 2 зображена кінематична схема приводу оригінального зведеного зчеплення у початковому та крайніх положеннях при включенні першого і другого зчеплень.

Виконуючий пристрій (ВП) через підсилювач (П) діє на важіль OB , який пов'язаний з корпусом шарніром B . Точка O важеля OB з нейтрального положення при включенні першого зчеплення переміщується до точки O_1 , а при включенні другого зчеплення – до точки O_2 .

Загальне передаточне кінематичне число i_k приводу є відношенням робочого ходу на пересувній

каретці, а саме відстань, яку вона проходить (GG_1 або GG_2), до відповідного переміщення на виконуючому механізмі (OO_1 або OO_2):

$$i_{k1(2)} = \frac{OO_{1(2)}}{GG_{1(2)}} \quad (1)$$

Переміщення точки A важеля OB через чотириох ланковий стрижневий механізм $BACD$ приводить до переміщення точки C і, відповідно, до обертання ланки CD , яка шарнірно пов'язана з корпусом у точці D .

Ланка CD жорстко зв'язана з ланкою DE , утворюючи при цьому здвоєний важіль CDE . Кут $\angle EDC$ вибираємо конструктивно.

Ланка DE через рухомий шарнір E з'єднується з ланкою EF , яка виконує функцію натискного підшипника зчеплення і через стрижень FG визначає положення G пересувної каретки. У початковому положенні $DE \perp EF$. Кут $\angle EDC$ вибираємо конструктивно.

При переміщенні точки F на відстані $FF_{1(2)}$ каретка пересувається на відстані $GG_{1(2)}$ і при цьому включаються зчеплення 1 або 2.

Переміщення точки F і, відповідне, переміщення каретки G пов'язані залежністю:

$$RF_{1(2)}^2 + RG_{1(2)}^2 = FG^2 = l_9^2 \quad (2)$$

Для дослідження механізму здвоєного зчеплення побудовано математичну модель, у якій використовуються наступні залежності.

Переміщення точки A визначає її рух по колу радіуса $BA = l_1$ та кут $\varphi_{1(2)}$ хитання ланки BO :

$$\varphi_{1(2)} = \arctg(OO_{1(2)} / BO) \quad (3)$$

Через кут хитання $\varphi_{1(2)}$ ланки BA визначаємо кут хитання $\gamma_{1(2)}$ ланки CD і, відповідно, кут $\varepsilon_{1(2)}$ хитання ланки DE , який визначає хід натискного підшипника F :

$$FF_{1(2)} = DE \cdot \tg \varepsilon_{1(2)} \quad (4)$$

Використовуючи залежність (2) можна визначити переміщення каретки G , тобто побудувати закон керування для ВП.

На рис. 3 наведена залежність переміщення $\Delta O_{1(2)}$ шарніра O на ВП для забезпечення повного включення 1-го (2-го) зчеплення від положення каретки $G_{1(2)}$ відносно початкового (нейтрального) положення каретки.

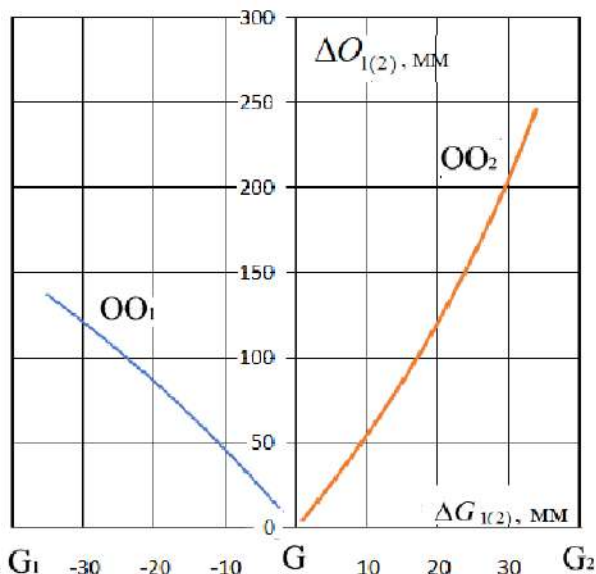


Рис. 3 – Залежність $\Delta O_{1(2)} = f(G_{1(2)})$

Для прийнятих конструктивних параметрів досліджуваного здвоєного зчеплення встановлено, що хід ВП при переміщенні каретки на $\Delta G = \mp 35$ мм (знак «-» при включенні 1-го зчеплення, знак «+» – 2-го зчеплення) складає, відповідно, $\Delta Q_1 = 138$ мм та $\Delta Q_2 = 258$ мм. З метою зниження таких переміщень ВП обмежуємо, попередньо, хід каретки у межах $\Delta G_{1(2)} = \mp 20$ мм. При цьому враховано, що переміщення на ВП не повинно бути занадто малим для можливості забезпечення слідкуючої дії, точного та плавного переміщення натискного диску зчеплення.

Важливим елементом у системі керування є ланка FG , що передає зусилля від натискного підшипника F до каретки G , і, як показує аналіз, довжина якого суттєво впливає на хід ВП (рис. 4).

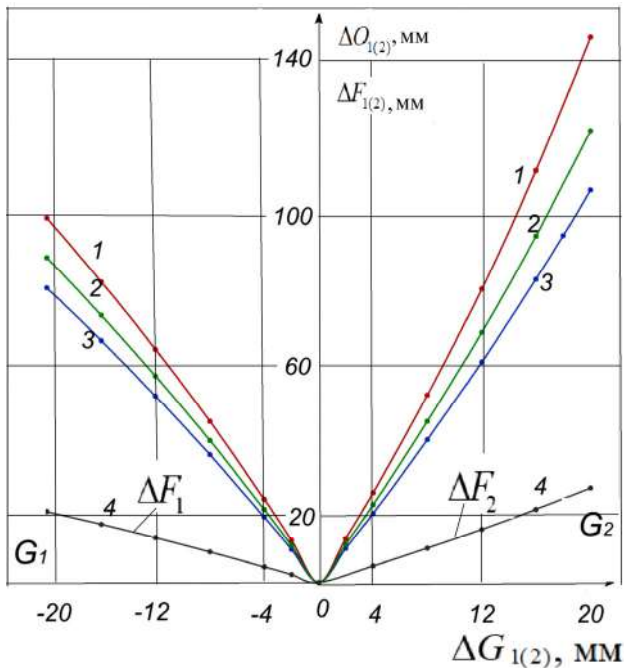
Як видно з рис. 4 збільшення довжини важеля FG зменшує хід ВП, але бажання вибрати збільшену величину важеля FG обмежує габаритний розмір зчеплення. Для досліджуваного здвоєного зчеплення прийнято $l_9 = 210$ мм.

Для цього варіанта довжина важеля FG на рис. 4 показано (крива 4) і відповідний хід $\Delta F_{1(2)}$ натискного підшипника.

Залежність загального кінематичного передаточного числа i_k від переміщення каретки має нелінійний характер і наведена на рис. 5.

У результаті проведеного розрахунку встановлено, що для обраних параметрів муфти та приводу зчеплення кінематичне передаточне число складатимуть: для включення першого зчеплення – 4,33, другого – 6,02, тобто є не однакове $i_{k1} \neq i_{k2}$. При переміщенні каретки на $\Delta G = \mp 20$ мм переміщення ВП для повного включення першого та

другого зчеплень складатиме, відповідно, 78,5 мм та 104,6 мм (рис. 4, крива 3), що треба враховувати у системі керування приводом.



1 – $l_g = 0,18$ м, 2 – $l_g = 0,2$ м, 3 – $l_g = 0,21$ м
Рис. 4 – Вплив довжини l_g важеля FG на хід ВП

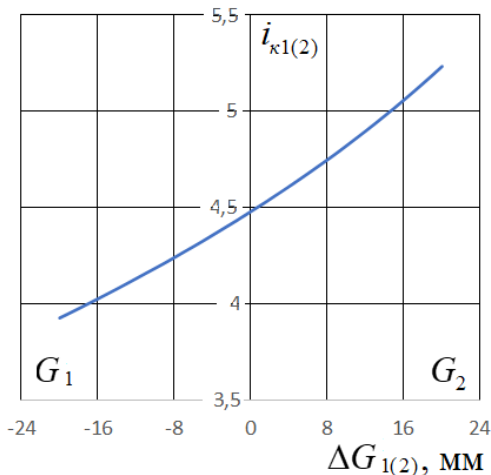


Рис. 5 – Залежність $i_{к1(2)} = f(G_{1(2)})$

Як показують розрахунки для забезпечення найбільш раціонального переміщення натискного підшипника (т. F) обирається кут β у нейтральному положенні каретки в межах $30^\circ \dots 45^\circ$.

Переміщення натискного диска M визначаємо через кут θ хитання ланки NP :

$$\Delta M = \Delta N = NP \cdot \operatorname{tg} \theta. \quad (5)$$

Вищезазначені переміщення $\Delta M, \Delta N$ створюються за рахунок дії сил P від натискних

пружин і заданого положення G каретки і, відповідно, пов'язані із силовим розрахунком механізму.

Силовий аналіз приводу

Основним параметром, впливаючим на зусилля у приводі зчеплення, є максимальний момент двигуна транспортного засобу, бо зі збільшенням моменту для уникнення пробуксовки зчеплення необхідно збільшувати зусилля натискних пружин, які діють на натискний диск. Наступним фактором, який впливає на розподіл зусиль у приводі є коефіцієнт f_k опору кочення каретки по поверхні опорного диску. Він залежить від матеріалу з якого виконані ролики каретки та опорний диск. Цей коефіцієнт може змінюватися, наприклад, $f_k = 0,001$ – для «сталі по сталі» і $f_k = 0,005$ – для «сталь по чавуну» [25]. У запропонованій конструкції здвоєного зчеплення на роботу по включенню-виключенню зчеплень впливає сила прижиму натискних пружин, але в значно меншій мірі порівняно зі звичайною конструкцією зчеплень. Це досягається завдяки пересувній роликовій каретці G , зміщення якої призводить до нахилу поворотного важеля PN , а відповідно і включенню одного зі зчеплень.

При силовому розрахунку важливим є визначення мінімального часу перемикання зчеплень. У здвоєних зчепленнях для забезпечення мінімального розриву потоку потужності при переключенні передач, порівняно зі звичайними, цей час не повинен перевищувати 0,1с. Виходячи з цього, потрібно вибрати потужність ВП приводу зчеплень з високою швидкістю.

Схема дії внутрішніх сил у кінематичних парах (шарнірах) механізму, сили тиску натискної пружини P , інерційних сил на кожному важелі приводу та нажимному диску наведена на рис. 6.

Облік інерційних сил слід враховувати після зіставлення їх з силами, усієї розглянутої системи сил.

Зусилля на переміщення роликової каретки $F_{кар}$ значним чином залежить від діючої на неї притискаючої сили F_{Gp} :

$$F_{кар} = f_k \cdot F_{Gn}, \quad (6)$$

де f_k – коефіцієнт опору кочення роликів рухомої каретки G по поверхні стійки, F_{Gn} – нормальна реакція кінематичної пари «каретка - стійка», яка залежить від сили натискання пружини F_p та сили F_{Gx} з боку важеля FG приводу керування:

$$F_{Gn} = F_{Gp} + F_{Gx}. \quad (7)$$

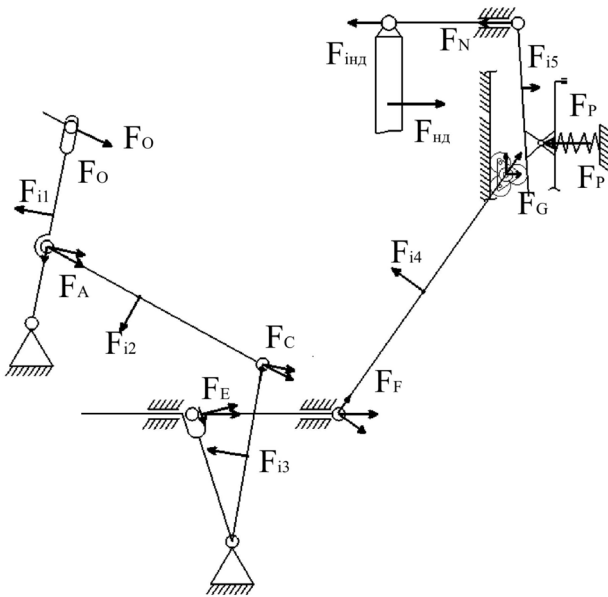


Рис. 6 – Схема передачі сил на ланки привода механізму здвоєного зчеплення

Силу F_p тиску нажимної пружини залежить від попереднього натягу F_{p0} та та величині деформування пружин Δ_p :

$$F_p = F_{p0} - c_p \cdot \Delta_p, \quad (8)$$

де c_H – коефіцієнт жорсткості нажимної пружини.

Сила F_{GP} притискання каретки важелем FG залежить від кута γ нахилу цього важеля (див. рис. та сили F_G від натискного підшипника:

$$F_{GP} = F_G \cdot \cos^2 \gamma. \quad (9)$$

Застосовуючи кінестатичний метод силового розрахунку з використанням принципу Д'аламбера визначаємо усі реакції у шарнірах досліджуваного механізму привода керування зчепленням.

На рис. 7 наведена залежність між силою F_0 , що необхідно прикласти до каретки, щоб її пошунути в різних місцях розташування. Потрібні зусилля тиску на ВП коливаються у межах (65...150) Н, що є задовільним.

Залежність між означеними зусиллям F_0 на ВП та зусиллям F_F на натискному підшипнику наведена на рис. 8. Силове передаточне число між означеними ланками складає близько 6.

Для обраних параметрів привода загальне силове передаточне число $i_{cp} = F_{GP} / F_0$ при включенні першого зачеплення лежить в межах 8,9...11,6, а для включення другого зчеплення 5,0...8,2.

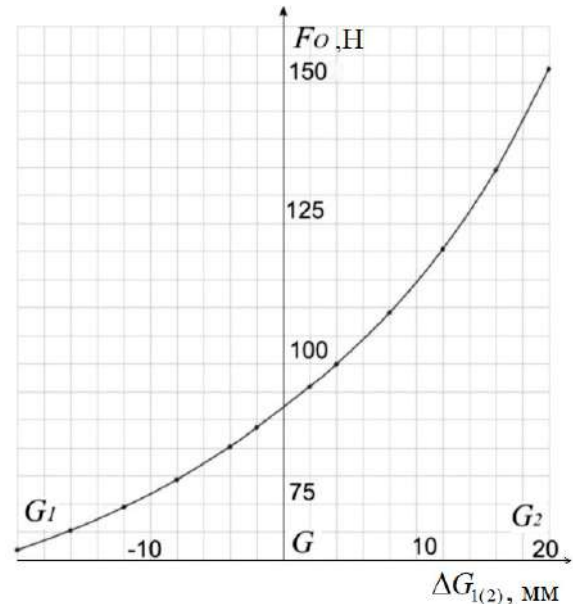


Рис. 7 – Зусилля на ВП для забезпечення пересування каретки при різних її положеннях

При моделюванні роботи запропонованої конструкції зчеплення встановлено, що сила натиску на каретку зростає не однаково при включенні 1-го і 2-го зчеплень.

Встановлено також, що особливою властивістю запропонованої конструкції зчеплення є незначне передаточне число $i_c = F_{Gy} / F_0$ між зусиллям F_{Gy} , яке потрібне для пересування каретки, та зусиллям F_0 на ВП, яке коливається у межах 2,8...3,0 (рис. 9).

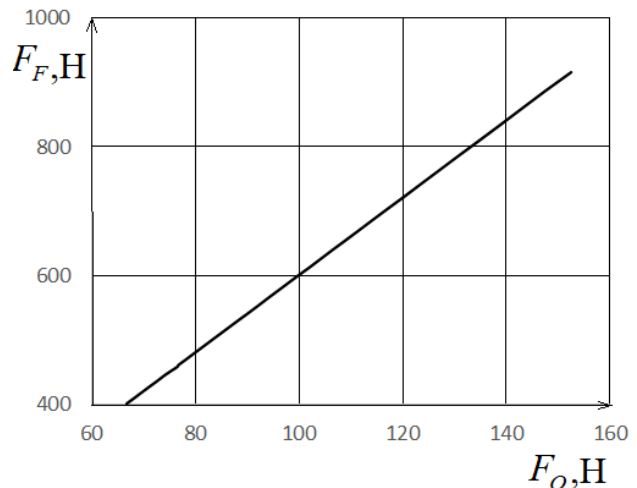


Рис. 8 – Залежність $F_F = f(F_0)$

Важливим параметром у роботі привода здвоєного зчеплення, для забезпечення його переваг над звичайним, є час перемикання зчеплень. Мала втрата швидкості машини при переключенні передач буде при мінімальному часі переключенні зчеплень.

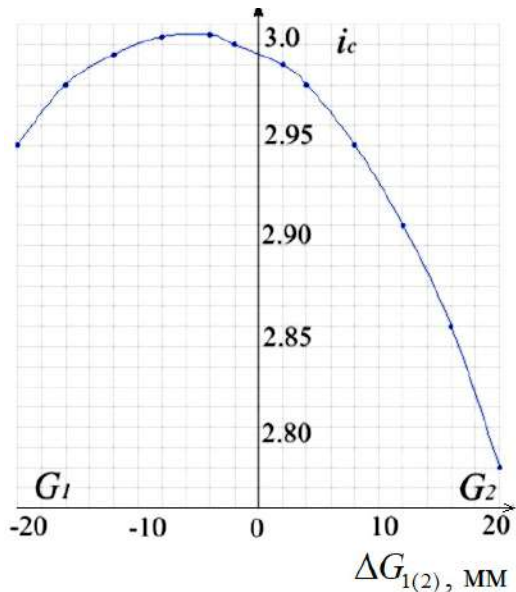


Рис. 9 – Залежність $i_c = f(\Delta G)$

Потужність, яка необхідна для переміщення роликів каретки за допомогою привода зчеплення, визначається відношенням роботи, яка виконується при переміщенні каретки, до необхідного часу переключення зчеплень за формулою:

$$P = \frac{A}{t \cdot \eta_{пр}}, \quad (10)$$

де A – робота, що необхідна для повного включення зчеплення; t – час руху привода зчеплення; $\eta_{пр}$ – коефіцієнт корисної дії приводу.

Робота на включення зчеплення складатиме:

$$A = \int_0^{O_{1(2)}} F_O \cdot d(O) \approx \sum_k F_{Ok} \cdot \Delta O_k, \quad (11)$$

де F_{Ok} , ΔO_k – середня сила на ВП, яка діє на k -ій ділянці ходу довжиною ΔO_k .

Аналіз показує що для досліджуваної конструкції робота на виконуючому механізмі для повного включення 1-го зчеплення складає 6,2 Дж, а 2-го – 12,4 Дж (рис. 10).

Якщо прийняти час включення зчеплення 0,1 с, то це значить, що потужність на ВП складатиме 0,062 кВт і 0,124 кВт для включення 1-го і 2-го зчеплення, відповідно. Отриманий результат свідчить про значні переваги зведеного зачеплення з точки зору енергозбереження.

Розрахунок проводився для силової установки з номінальним крутним моментом двигуна 600-700Н·м, що відповідає таким транспортно-тяговим машинам як ХТЗ-150К09, КраЗ-5401Н2 і т.д.

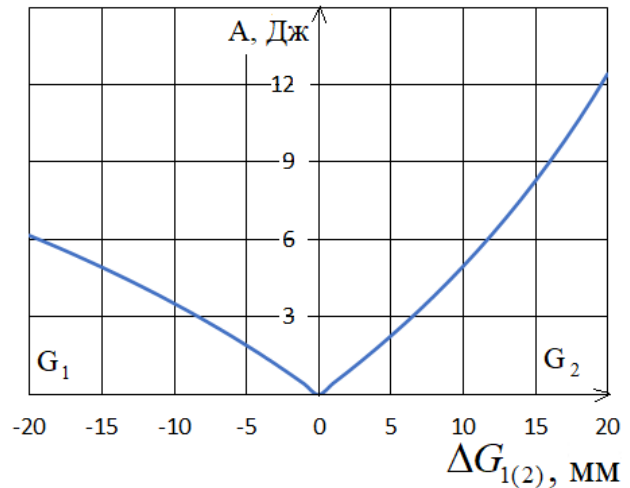


Рис. 10 – Робота сил на ВП для забезпечення повного включення першого і другого зчеплення

Попередня оцінка величин інерційних сил показала то, що їх значення значно менш рушійних сил. Таким чином при попередніх розрахунках інерційними силами знехтували.

Висновок

На основі розробленої математичної моделі і виконаних кінематичного та силового аналізу підтверджено, що запропонована оригінальна важільна конструкція керування сухим зведеном зчепленням є ефективною. Представлений варіант конструкції дозволяє перемикає зчеплення зі меншими енерговитратами. Проте встановлено, що при цьому переміщення елементів механізму неоднакове, а сила стиснення фрикційних пар при включенні першого і другого зчеплення відрізняються, що може ускладнити систему керування, і, відповідно, треба подальші дослідження.

Огляд існуючих конструкцій зчеплень дозволив визначитись з напрямком їх вдосконалення, зокрема, сухих зведеном зчеплень. Запропонована оригінальна конструкція приводу керування сухим зведеном зчепленням, яка передбачає використання важільного механізму із застосуванням поворотних упорів, що виконані у вигляді пересувних кареток з роликами і забезпечують перемикає зчеплення практично без розриву потоку потужності, спрощує конструкцію зчеплення та зменшує енерговитрати на керування.

За допомогою математичної моделі запропонованого сухого зведеного зчеплення проаналізовано роботу механізму керування і вплив його окремих конструктивних параметрів на якісні показники роботи зчеплення, зокрема, на кінематичні характеристики приводу зчеплення, діапазони кінематичних та силових передаточних чисел приводу, силову взаємодію ланок механізму, потужність виконуючого пристрою зчеплення.

Отримані результати дозволяють обґрунтовано визначати параметри зчеплення, але і вказують на необхідність продовження досліджень і постановку задачі оптимально-раціонального параметричного синтезу конструкції механізму керування здвоєним зчепленням.

Список літератури

1. Острецов А. В., Красавин П. А., Воронин В. В. *Автомобильные сцепления*: Учебное пособие по дисциплинам «Конструкция автомобиля» для студентов вузов, обучающихся по специальности 190210 «автомобиле- и тракторостроение». М.: МГТУ «МАМИ», 2011. 99 с.
2. Барский И. Б., Борисов С. Г., Галягин В. А. *Сцепления транспортных и тяговых машин*. М.: Машиностроение, 1989. 344 с.
3. Сергієнко М. Є., Свідло В. С., Кузьменко Л. В. Аналіз сучасних конструкцій здвоєних зчеплень транспортно-тягових машин. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Автомобіле- і тракторобудування*. Х.: НТУ «ХПІ», 2018. № 49 (1325). С. 50-57.
4. Пат. на винахід України №101711, В60К 17/02, В60К 23/00, F16D 13/38. *Двотоктова муфта зчеплення*/ Сергієнко М.Є., Сергієнко А.М., Худолій О.І. Заявка а2011 08339. Заявл. 04.07.2011. Опубл. 25.04.2013. Бюл. №8.
5. Емельянов И. П. Исследования динамики управляемого электромеханического привода сцепления автомобиля: *дис. ... канд. техн. наук*. Курский национальный технический ун-т. Курск, 2007. 121с.
6. Коробки передач VAG. URL: <https://otoba.ru/transmissii/vag> (дата звернення: 02.03.2021).
7. Зайцев А. Р. Исследование статического равновесия сухого фрикционного двойного сцепления. *Механизация строительства*. 2013. № 1. С. 14–19.
8. Зайцев А. Р. Методика определения оптимальных параметров настройки системы управления сухим фрикционным двойным сцеплением. *Механизация строительства*. 2013. № 3. С. 10–13.
9. Szimandl B., Nemeth H. Dynamic hybrid model of an electro-pneumatic clutch system. *Mechatronics*. 2013. 23. 36 p.
10. Клименко В. І. Теоретичні основи створення та вдосконалення пневматичних апаратів гальмівного керування, підвіски та зчеплення автотранспортних засобів. *дис. ... док. техн. наук*. Харків, 2018. 563 с.
11. Поддубко С. Н. и др. Эффективность применения коробок передач с двойным сцеплением в автобусах городского типа. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2015. № 1(30). С. 5–11.
12. Басалаев В. Н., Коваленко А. В. Исследование процесса переключения передач под нагрузкой и оптимизация управления фрикционными муфтами механической трансмиссии. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2011. № 2(15). С. 24–32.
13. Михайлович М. Г. Теоретичні основи системи керування зчепленням транспортних засобів категорій N₃ та M₃ з механічною трансмісією. *дис. ... док. техн. наук*. Харків, 2021. 368 с.
14. Шарипов В. М., Дмитриев М. И., Зенин А. С. Математическая модель процесса переключения передач в коробке передач трактора. *Наука и*

- образование: науч. издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2014. № 5. С. 50–65. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/711329.html>.
15. Вернигор В. А., Солонский А. С. *Переходные режимы тракторных агрегатов*. М.: Машиностроение, 1983. 183с.
 16. Львовский К. Я. и др. *Трансмиссии тракторов*. М.: Машиностроение, 1976. 280 с.
 17. Микнас В. В., Попиоль Р., Шпренгер А. *Автомобильные сцепления, трансмиссии, приводы*. Перевод с нем. ООО «СтарСПб». М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2012. 352 с.
 18. Сергієнко М. Є., Перевозник А. С., Свідло В. С. Розробка системи керування і дослідження елементів оригінального здвоєного зчеплення. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018*, 16-18 травня 2018р.: у 4 ч. Ч. I. за ред. проф. Сокола Є.І. Харків: НТУ „ХПІ”. 188 с.
 19. Пат на винахід України 114964 Пристрій для керування двопотоковою муфтою зчеплення транспортного засобу / Сергієнко А.М., Сергієнко М.Є., Худолій О.І., Ткачук М.А., Гасанов М.І., Павлова Н.М., Ткаченко О.О. // *Патенти і винаходи: Винаходи – 2017*.
 20. Пат. на винахід України №118124 Система керування муфтою зчеплення транспортного засобу / Сергієнко М.Є., Сергієнко А.М., Худолій О.І., Гасанов М.І., Гапон А.І., Павлова Н.М., Цукор Д.Ю./ В60К 23/02, F16D 13/38, F16D 23/12, F16D 21/06, F16D 48/06, F16H 61/688. Заявка а2016 12321. Заявл. 05.12.2016. Опубл. 26.11.2018, Бюл. №22.
 21. Serrarens A., Dassen M., Steinbuch M. Simulation and control of an automotive dry clutch. *Proceedings of the 2004 American Control Conference*. Boston, MA, USA. 2004. Vol. 5. P. 4078-4083. doi: 10.23919/ACC.2004.1383947.
 22. Jinsung Kim, Seibum B. Choi. Control of Dry Clutch Engagement for Vehicle Launches via a Shaft Torque Observer. *American Control Conference Marriott Waterfront*. Baltimore, MD, USA June 30-July 02.2010. P. 676–681.
 23. Uwe Kiencke, Lars Nielsen. *Automotive Control Systems. For Engine, Driveline, and Vehicle*. Second edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2005. 511 p.
 24. Roland Welter, Tirm Herrmann, Sebastian Honselmann, Jeremy Keller. Clutch Release Systems. *Schaeffler SYMPOSIUM*. 2010. P. 94 – 111.
 25. Полошкин Н. Г. *Основы теории трения, износа и смазки*: учеб. Пособие. Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2013. 192 с.

References (transliterated)

1. Ostretsov A. V., Krasavin P. A., Voronin V. V. *Avtomobil'nyye stsepleniya*: Uchebnoye posobiye po distsiplinam «Konstruktsiya avtomobilya» dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po spetsial'nosti 190210 «Avtomobile- i traktorostroyeniye». M. MGТУ «МАМУ», 2011. 99 s.
2. Barskiy I. B., Borisov S. G., Galyagin V. A. *Stsepleniye transportnykh i tyagovykh mashin*. M. Mashinostroyeniye, 1989. 344 s.
3. Sergiyenko M. Ye., Svidlo V. S., Kuz'menko L. V. Analiz sovremennykh konstruktsiy sdvoyennykh stsepleniyy transportno-tyagovykh mashin. *Vestnik NTU "KHPI"*. Seriya: *Avtomobile- i traktorostroyeniye*. Kh.: NTU «KHPI», 2018. №49 (1325). S. 50-57.

4. Pat. na izobreteniyе Ukrainy №101711, B60K 17/02, B60K 23/00, F16D 13/38. Dvukhpotochnaya mufta stsepleniya/ Sergiyenko M.Ye., Sergiyenko A.M., Khudoliy A.I. Zayavka a2011 g. 08339. Zayavl. 04.07.2011. Opubl. 25.04.2013. Byul. №8.
5. Yemel'yanov I. P. Issledovaniya dinamiki upravlyayemogo elektromekhanicheskogo privoda stsepleniya avtomobilya: dis. ... kand. tekhn. nauk. Kurskiy natsional'nyy tekhnicheskyy un-t. Kursk, 2007. – 121s.
6. Korobki peredach VAG. Available at: <https://otoba.ru/transmissii/vag> (accessed 02.03.2021).
7. Zaytsev A. R. Issledovaniye staticheskogo ravnovesiya sukhogo friktsionnogo dvoynogo stsepleniya. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*, 2013, 1, pp. 14–19.
8. Zaytsev A. R. Metodika opredeleniya optimal'nykh parametrov nastroyki sistemy upravleniya sukhim friktsionnym dvoynym stsepleniym. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*, 2013, 3, pp. 10–13.
9. Szimandl B., Nemeth H. Dynamic hybrid model of an electro-pneumatic clutch system. *Mechatronics*, 2013, 23, pp. 36.
10. Klimenko V. I. Teoreticheskiye osnovy sozdaniya i usovershenstvovaniya pnevmaticheskikh apparatov tormoznogo upravleniya, podveski i stsepleniya avtotransportnykh sredstv. dis. ... dok. tekhn. nauk. Khar'kov, 2018. 563s.
11. Poddubko S. N. et al. Effektivnost' primeneniya korobok s dvoynym stsepleniym v avtobusakh gorodskogo tipa. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*, 2015, 1(30), pp. 5–11.
12. Basalayev V. N., Kovalenko A. V. Issledovaniye protsessa pereklyucheniya peredach pod nagruzkoy i optimizatsiya upravleniya friktsionnymi muftami mekhanicheskoy transmissii. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*, 2011, 2(15), pp. 24–32.
13. Mikhaylevich M. G. Teoreticheskiye osnovy sistemy upravleniya stsepleniym transportnykh sredstv kategoriy N3 i M3 s mekhanicheskoy transmissiyey. dis. dok. tekhn. nauk. Khar'kov, 2021. 368 s.
14. Sharipov V. M., Dmitriyev M. I., Zenin A. S. Matematicheskaya model' protsessa pereklyucheniya peredach v korobke traktora. *Nauka i obrazovaniye: nauch. izdaniye MGTU im. N.E. Bauman*, 2014, 5, pp. 50–65. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/711329.html>.
15. Vernigor V. A., Solonskiy A. S. Perekhodnyye rezhimy traktornykh agregatov. M. Mashinostroyeniye, 1983. 183 s.
16. L'vovskiy K. Ya. et al. *Transmissii traktorov*. M. Mashinostroyeniye, 1976. 280 s.
17. Miknas V. V., Popiol' Rayner, Shprenger Aksel'. *Avtomobil'nyye stsepleniya, transmissii, privody*. Perevod s nem. OOO «StarSPb». M.: OOO «Knizhnoye izdatel'stvo «Za rulem», 2012. 352 s.
18. Sergiyenko M. Ye., Perevozchik A. S., Svidlo V. S. Razrabotka sistemy upravleniya i issledovaniya elementov original'nogo sdvoynogo stsepleniya. *Informatsionnyye tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnologiya, obrazovaniye, zdorov'ye: tezis dokladov XXVI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii MicroCAD-2018*, 16-18 maya 2018: v 4 ch. CH. I. pod red. prof. Sokola Ye.I. Khar'kov: NTU „KHPi”. 188 s.
19. Pat na izobreteniyе Ukrainy 114964 Ustroystvo dlya upravleniya dvukhpotochnoy muftoy stsepleniya transportnogo sredstva / Sergiyenko A.M., Sergiyenko M.Ye., Khudoliy A.I., Tkachuk M.A., Gasanov M.I. ., Tkachenko Ye.A. // Patenty i izobreteniya: Izobreteniya – 2017.
20. Pat. na izobreteniyе Ukrainy №118124 Sistema upravleniya muftoy stsepleniya transportnogo sredstva / Sergiyenko M.Ye., Sergiyenko A.M., Khudoliy Ye.I., Gasanov M.I., Gapon A.I., Pavlova N.M., Sakhar D .YU./B60K 23/02, F16D 13/38, F16D 23/12, F16D 21/06, F16D 48/06, F16H 61/688. Zayavka a2016 12321. Zayavl. 05.12.2016. Opubl. 26.11.2018, Byul. №22.
21. Serrarens A., Dassen M., Steinbuch M. Simulation and control of an automotive dry clutch. *Proceedings of the 2004 American Control Conference*. Boston, MA, USA. 2004, Vol. 5, pp. 4078-4083. doi: 10.23919/ACC.2004.1383947.
22. Jinsung Kim, Seibum B. Choi. Control of Dry Clutch Engagement for Vehicle Launches via a Shaft Torque Observer. *American Control Conference Marriott Waterfront*. Baltimore. MD. USA June 30-July 02.2010, pp. 676–681.
23. Uwe Kiencke, Lars Nielsen. *Automotive Control Systems. For Engine, Driveline, and Vehicle*. Second edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 511 p.
24. Roland Welter, Tirm Herrmann, Sebastian Honselmann, Jeremy Keller. Clutch Release Systems. *Schaeffler SYMPOSIUM*, 2010, pp. 94–111.
25. Polyushkin N. G. *Osnovy teorii treniya, iznosa i smazki*. ucheb. Posobiye. Krasnoyar. gos. agrar. un-t. Krasnoyarsk, 2013. 192 s.

Відомості про авторів (About authors)

Сергієнко Микола Єгорович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Автомобіле- і тракторобудування»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5168-1924>; e-mail: nesergienko@gmail.com.

Nikolay Sergienko – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Docent, National Technical University "Kharkov Polytechnic University", Professor of Department of Automobile and Tractor Engineering; Kharkov, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5168-1924>; e-mail: nesergienko@gmail.com.

Калінін Павло Миколайович – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, Національна академія Національної гвардії України, доцент кафедри інженерної механіки; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9724-0630>; e-mail: pkalining@gmail.com.

Pavel Kalinin – Candidate of Technical Sciencal (Ph.D), Docent, National Academy of the National Guard of Ukraine, Associate Professor of the Department of Engineering Mechanics; Kharkov, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9724-0630>; e-mail: pkalining@gmail.com.

Гасанов Магамедмін Ісагамедович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», проректор з науково-педагогічної роботи, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2161-2386>; e-mail: kh.kajvika@gmail.com.

Magomedemin Gasanov – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkov Polytechnic University", Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Work, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology and Metal-Cutting Machines; Kharkov, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2161-2386>; e-mail: kh.kajvika@gmail.com.

Павлова Наталія Миколаївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології та системи», м. Харків, Україна; тел.: (063) 245-88-58; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0621-1365>; e-mail: nnpavlovann@gmail.com

Natalia Pavlova – assistant, Department of Information and Measurement Technologies and Systems, National Technical University "Kharkov Polytechnic University"; Kharkov, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0621-1365>; e-mail: nnpavlovann@gmail.com.

Свідло Віталій Сергійович – аспірант кафедри «Автомобіле- і тракторобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4614-3125>; e-mail: svivs@ukr.net.

Vitaliy Svidlo – graduate student, Department of Automobile and Tractor Engineering, National Technical University "Kharkov Polytechnic University"; Kharkov, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4614-3125>; e-mail: svivs@ukr.net.

Окунь Антон Олександрович – кандидат технічних наук, доцент Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6467-4229>; e-mail: okunanton@gmail.com

Anton Okun – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Docent, National Technical University "Kharkov Polytechnic University", Docent of the Department of Computer Modeling and Integrated Forming Technologies; Kharkov; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6467-4229>; e-mail: okunanton@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Сергієнко М. С., Калінін П. М., Гасанов М. І., Павлова Н. М., Свідло В. С., Окунь А. О. Аналіз параметрів приводу зведеного зчеплення зі зменшеними енерговитратами на керування. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 49-60. doi: 10.20998/2413-4295.2021.04.07.

Please cite this article as:

Sergienko N., Kalinin P., Gasanov M., Pavlova N., Svidlo V., Okun A. Analysis of the parameters of the double clutch drive with reduced control energy consumption. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4 (10), pp. 49-60, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.07.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Сергієнко Н. Е., Калінін П. Н., Гасанов М. И., Павлова Н. Н., Свідло В. С., Окунь А. А. Анализ параметров привода сдвоенного сцепления с уменьшенными энергозатратами на управление. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 49-60. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.07.

АННОТАЦІЯ *Мировая тенденция улучшения трансмиссий транспортных и тяговых средств связана с использованием роботизированных преселективных коробок переключения передач, важным узлом которой является фрикционное сцепление. Проведенный обзор существующих конструкций и анализ концепций развития сцеплений позволяет определиться с направлениями их усовершенствования, в частности, усовершенствованием сухих сдвоенных сцеплений, которые являются предметом исследования в данной работе. Существенным недостатком существующих конструкций сдвоенных сцеплений является использование дополнительных специальных (преимущественно гидравлических или комбинированных) систем для включения-выключения в работу фрикционных пар, что увеличивает стоимость конструкции, расход энергии на управление и усложняет конструкцию, обслуживание и ремонт. Предлагаемая конструкция привода управления оригинального сухого сдвоенного сцепления предусматривает использование рычажного механизма с применением поворотных упоров, выполненных в виде передвижных кареток с роликами, что обеспечивает переключение сцеплений за короткое время и практически без разрыва потока мощности и, соответственно, улучшает динамику разгона транспортных средств. конструкцию сцепления и уменьшает энергозатраты по его управлению как в процессе начала движения машины, так и при переключении передач. Разработана математическая модель предложенного привода сцепления, на основе которой смоделирована работа механизма управления и проанализировано влияние его отдельных конструктивных параметров на качественные показатели работы привода сцепления, в частности, на кинематические характеристики привода, диапазоны кинематических и силовых передаточных чисел привода, силовое взаимодействие звеньев механизма устройства при включении каждого сцепления. Установлено, что для переключения сцеплений требуются меньшие энергозатраты, что перемещение элементов механизма неодинаково, а сила сжатия фрикционных пар при включении первого и второго сцеплений отличаются. Результатами моделирования подтверждено, что предложенная оригинальная рычажная конструкция механизма управления сцеплениями является эффективной. Полученные результаты позволяют обоснованно определять параметры сцепления, однако выбор оптимально-рациональных параметров механизма управления требует проведения дальнейших исследований, для проведения которых разработаны соответствующие методика, алгоритм поиска и их программная реализация.*

Ключевые слова: *сухое сдвоенное сцепление; привод управления; рычажный механизм, кинематическая пара; передаточное число; кинематические параметры; силовой расчет; математическая модель; транспортное средство*

Надійшла (received) 01.11.2021

УДК 681.5.013

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.08

МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗУЮЧИЙ РЕГУЛЯТОР ДУТТЄВОГО РЕЖИМУ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ

О. В. СТЕПАНЕЦЬ, Ю. І. МАРІЯШ*

кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, УКРАЇНА
*e-mail: mariahyuriy@gmail.com

АНОТАЦІЯ На сьогоднішній день в Україні та у світі актуальною є проблема енергозбереження та зниження вартості виплавленої сталі. Металургійні підприємства розвиваються в умовах жорсткої конкуренції, основна причина – українська продукція надзвичайно енергомістка через зношеність основних фондів та застарілі технологічні процеси. Киснево-конвертерний процес – це процес виробництва сталі з рідкого чавуну з додаванням сталевого брухту в конвертер і продувкою киснем зверху крізь водоохолоджувальну фурму. Сьогодні отримання сталі за допомогою киснево-конвертерного процесу є найпопулярнішим у світі та набуває все більшого розповсюдження. Основним недоліком киснево-конвертерного способу є необхідність надання початкової кількості тепла (у вигляді рідкого чавуну) і як наслідок – обмеження в переробці металевих брухту. Зниження собівартості киснево-конвертерної сталі досягається через підвищення частки металобрухту за рахунок підвищення ступеня допалювання CO до CO₂ в порожнині конвертера, шляхом оптимального керування параметрами дуттєвого режиму з використанням модельно-прогнозуючого керування. Принцип модельно-прогнозуючого керування базується на математичній моделі об'єкта. Такий підхід мінімізує функціонал, що характеризує якість процесу. У якості функціоналу було обрано лінійно-квадратичний функціонал. Запропоновано прогнозуючу модель з урахуванням обмежень на зміну положення фурми та пневматичного клапану подачі кисню. Встановлено, що зміна швидкості зневуглицювання металу залежить від відстані фурми до рівня спокійної ванни і впливає на ступень допалювання CO до CO₂. Процес зневуглицювання є нестационарним, описується аперіодичною ланкою першого порядку, коефіцієнт передачі й постійна часу якої залежить від періоду плавки й тривалості продувки. Вдосконалено математичну модель дуттєвого режиму киснево-конвертерної плавки за рахунок врахування впливу інтенсивності дуття на процес зневуглицювання ванни, що дозволило підвищити точність та якість керування дуттям в умовах зміни витрати кисню під час продувки. Результати моделювання системи автоматичного керування показують, що модельно-прогнозуючий регулятор забезпечує необхідний рівень CO₂ в конвертерних газах при зміні витрати кисню на продувку.

Ключові слова: модельно-прогнозуюче керування; оптимальне керування; лінійно-квадратичний функціонал; киснево-конвертерний процес; модель в просторі станів

A MODEL PREDICTIVE CONTROLLER OF THE BLOWING MODE DURING BASIC OXYGEN FURNANCE PROCESS

O. STEPANETS, Yu. MARIASH*

Department of Automation of heat-and-power engineering processes, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT Today in Ukraine and the world, the problem of energy saving and reducing the cost of smelted steel is state of art. Metallurgical enterprises are developing in conditions of fierce competition, the main reason is that Ukrainian products are extremely energy-intensive due to the depreciation of fixed assets and outdated technological processes. The basic oxygen furnace process is a process of producing steel from liquid cast iron with the addition of steel scrap to the converter and blowing oxygen from above through a water-cooling lance. Nowadays, the production of steel by BOF process is the most popular in the world and is becoming increasingly common. The main disadvantage of the basic oxygen furnace is the need to provide the initial amount of heat (in the form of liquid cast iron) and as a consequence - restrictions on the processing of scrap metal. Reducing the cost of basic oxygen furnace steel is achieved by increasing the share of scrap metal by increasing the degree of afterburning of CO to CO₂ in the cavity of the converter, by optimal control of the parameters of the blast mode using model-predictive control. The principle of model-predictive control is based on a mathematical model of the plant. This approach minimizes the functional that characterizes the quality of the process. The linear-quadratic functional was chosen. A forecasting model is proposed taking into account the constraint on changing the position of the lance and the pneumatic oxygen supply valve. It was found that the change in the rate of decarburization of the metal depends on the distance of the lance to the level of the quiet bath and affects the degree of afterburning of CO to CO₂. The decarburization process is non-stationary, described by a first-order inertial model, the transfer coefficient and time constant of which depends on the melting period and the duration of the purge. The mathematical model of the blast mode of oxygen-converter melting has been improved, taking into account the influence of the blast intensity on the decarburization process of the bath, which allowed to increase the accuracy and quality of blast control in terms of changing oxygen flow during purging.

The simulation results of the automatic control system show that the model-predictive regulator provides the required level of carbon dioxide in the converter gases when the flow rate of oxygen for purge changes.

Keywords: Model Predictive Control; Optimal Control; Linear-Quadratic Functional; Basic Oxygen Furnace; State Space Model

Вступ

Кисневий конвертер призначений для виробництва сталі з рідкого чавуну та сталевого брухту при продуванні киснем. Сьогодні отримання сталі за допомогою киснево-конвертерного процесу (ККП) є найпопулярнішим у світі та набуває все більшого розповсюдження. Згідно зі статистичними даними частка ККП у світі складає 71.6% станом на кінець 2019 р. (70.8% станом на 2018 р.) [1]. В останні роки актуальними методами зниження вартості киснево-конвертерної сталі є засвоєння проектної потужності агрегатів, підвищення стійкості футерівки конвертерів, оптимізація та автоматизація технологічного процесу. Основним недоліком ККП є обмежена можливість збільшення частки металевго брухту. Для виготовлення сталі, в агрегат завантажують металевий брухт з часткою до 30% від металевго частини, решта рідкий чавун, який є значно дорожчим. На сьогоднішній день відомо декілька способів підвищення частки брухту у шихті: попередній підігрів металевго брухту поза конвертером та допалювання монооксиду до діоксиду вуглецю у порожнині конвертера [2]. Гази, які відходять з конвертера, в основному складаються з CO, тому ефективним методом є допалювання CO до CO₂, так як він не потребує додаткового устаткування, а для досягнення бажаних показників достатньо керувати параметрами дуттьового режиму, такими як положення фурми і витрати кисню. Одним із сучасних підходів до аналізу і синтезу систем керування, що базуються на математичних методах оптимізації, є теорія управління динамічними об'єктами з використанням прогнозуючих моделей - Model Predictive Control (MPC). Ідея оптимізації прогнозованої керуючої дії, яка складає основу MPC-методів, виникла в рамках двох незалежних, проте близьких по суті підходів [3]. Перший, Dynamics Matrix Control (DMC), розвивався зусиллями фахівців компанії Shell Oil в середині 60-х років, а другий - Model Algorithmic Control (MAC) - був розроблений французькими інженерами хімічної промисловості в кінці 60-х. На базі останнього підходу вперше був створений комерційний пакет програм IDCOM (Identification and Command), який певною мірою послужив прообразом сучасних методів управління з прогнозом. MPC-підхід використовує математичну модель об'єкта, початковими умовами для якої служить її поточний стан. При заданому управлінні виконується прогноз руху об'єкта на деякому кінцевому відрізку часу (горизонті прогнозу). Виконується оптимізація управління, метою якого служить наближення регулюючих змінних прогнозуючої моделі до відповідного заданого значення на горизонті прогнозу. Реалізується знайдене оптимальне управління і здійснюється вимір

(або відновлення по вимірним змінним) фактичного стану об'єкта на кінець кроку. Починаючи з наступного кроку прогноз та пошук оптимального керування повторюються для нового стану об'єкта. Основною перевагою MPC-підходу, що визначає його успішне використання в практиці побудови та експлуатації систем управління, служить відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку, що поєднується з високими адаптивними властивостями. Хоча 90% усіх контролерів використовують PID-закони [4], MPC швидко став популярним, особливо в хімічній та нафтопереробній промисловості, завдяки простоті алгоритму та використанню моделі в просторі станів і передавальних функцій. Деякі дослідники поєднують MPC з іншими підходами для генерації завдань локальним контролерам, такими як нечітка логіка [5], штучні нейронні мережі [6] та інші. Керування параметрами дуттьового режиму потребує застосування сучасних методів та є показовим для MPC підходу через нестационарність процесу зневуглецювання, тому використання модель-прогнозуючого керування користується популярністю у дослідників [7], є виправданим.

Мета роботи

Метою роботи є зниження собівартості киснево-конвертерної сталі, що є наслідком підвищення частки металобрухту за рахунок підвищення ступеня допалювання CO до CO₂ в порожнині конвертера, шляхом оптимального керування параметрами дуттьового режиму за допомогою модельно-прогнозуючого регулятора.

Виклад основного матеріалу

У сучасних умовах розвитку металургійного виробництва актуальними являються задачі по розробці ресурсозберігаючих технологічних режимів виплавки сталі, теоретичних і практичних аспектів нових енергозберігаючих способів продувки сталеплавильної ванни технологічним газом та підвищення ефективності теплової роботи печей. Одним із шляхів зниження витратних показників є утилізація фізичної та хімічної енергії газів, які відходять із конвертера. Використання частини утвореного конвертерного газу, в якості палива в порожнині конвертера для нагріву металевго брухту дозволить збільшити частку брухту (рис. 1) у шихті [8], що в результаті приведе до зниження собівартості киснево-конвертерної сталі. Найбільш розповсюдженим способом збільшення ступеня допалювання CO у порожнині конвертера є регулювання відстані фурми над рівнем спокійної ванни [9].

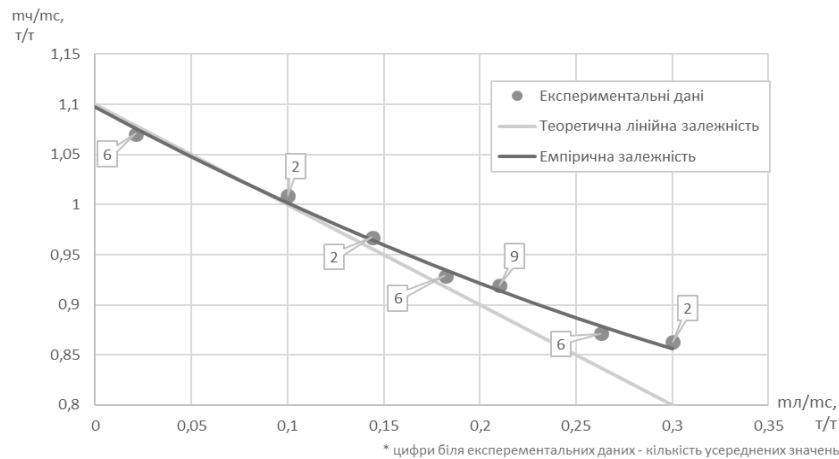


Рис. 1 – Залежність питомої (на тону сталі) маси рідкого чавуну від питомої маси лому

Перехідний процес зміни швидкості зневуглицювання $v_{\text{в}}$ від зміни відстані фурми до рівня спокійної ванни H описується інерційною ланкою першого порядку (1) виду[10]:

$$W_{v_c}(s) = \frac{k_{v_c}}{T_{v_c}s + 1}, \quad (1)$$

де $k_{v_c} \frac{m}{x\text{в} \cdot m}$ – коефіцієнт передачі по каналу відстань фурми до рівня спокійної ванни – швидкість зневуглицювання; $T_{v_c} \text{ с}$ – стала часу.

Величина постійної часу – нестационарна та залежить від періоду плавки (рис.2).

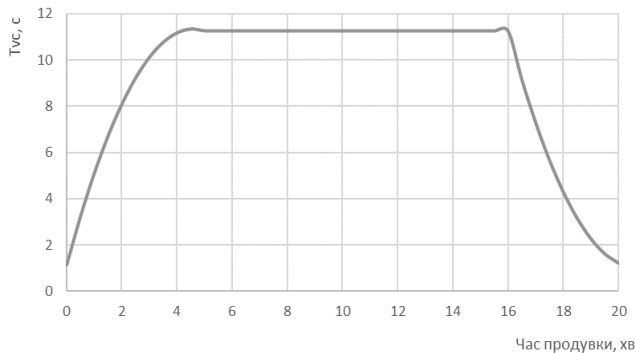


Рис. 2 – Залежність сталої часу від тривалості продувки

Зміна швидкості зневуглицювання приводить до зміни ступеня окиснення вуглецю до CO_2 у порожнині конвертера. Цей процес також описується [10] інерційною ланкою першого порядку виду (2):

$$W_{\gamma_{\text{CO}_2}}(s) = \frac{k_{\gamma_{\text{CO}_2}}}{T_{\gamma_{\text{CO}_2}}s + 1}, \quad (2)$$

де $k_{\gamma_{\text{CO}_2}} \frac{\% \text{CO}_2 \cdot x\text{в}}{m}$ – коефіцієнт передачі по каналу швидкість зневуглицювання – ступінь окиснення вуглецю до CO_2 ; $T_{\gamma_{\text{CO}_2}} \text{ с}$ – стала часу.

За результатами експериментальних досліджень[10] $T_{\gamma_{\text{CO}_2}} = 2,15 \text{ с}$; коефіцієнт передачі по каналу швидкість зневуглицювання – ступінь окиснення вуглецю до CO_2 визначається з балансового рівняння витрати дуття на продувку – $k_{\gamma_{\text{CO}_2}} = 3,33 \frac{\% \text{CO}_2 \cdot x\text{в}}{m}$.

Обидві ланки з'єднані послідовно (3) й передавальна функція системи в якій вхідна величина відстань фурми до рівня спокійної ванни, а вихідна – ступінь окиснення вуглецю до CO_2 , буде мати вид:

$$W_{v_c}(s) = \frac{k_{v_c} \cdot k_{\gamma_{\text{CO}_2}}}{(T_{v_c}s + 1)(T_{\gamma_{\text{CO}_2}}s + 1)} = \frac{k_{\gamma_{\text{CO}_2}}^H}{(T_{v_c}s + 1)(T_{\gamma_{\text{CO}_2}}s + 1)}, \quad (3)$$

де $k_{\gamma_{\text{CO}_2}}^H \frac{\% \text{CO}_2}{m}$ – коефіцієнт передачі по каналу відстань фурми до рівня спокійної ванни – швидкість зневуглицювання;

Лінійну прогнозуючу модель об'єкта управління можна представити у виді системи рівнянь:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0, & 1 \\ -\frac{1}{T_{v_c}(t)T_{\gamma_{\text{CO}_2}}}, & -\frac{T_{v_c}(t) + T_{\gamma_{\text{CO}_2}}}{T_{v_c}(t)T_{\gamma_{\text{CO}_2}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_{v_c}(t)T_{\gamma_{\text{CO}_2}}} \end{bmatrix} H(t), \\ \gamma_{\text{CO}_2}(t) = k_{\gamma_{\text{CO}_2}}^H(t)x_1(t) \end{cases}$$

Одним з основних параметрів дуття є інтенсивність продувки, від якого залежить хід процесів окиснення домішок і шлакоутворення[11]. Ступінь допалювання CO_2 в порожнині конвертера підвищується зі зростанням інтенсивності продувки, що пов'язано зі ростом швидкості зневуглицювання (рис. 3).

Технологічний об'єкт управління витрати кисню кисневого конвертера утворений фізичним з'єднанням пневмоприводу, регулюючого клапана (РК) та ділянкою трубопроводу з витратоміром, що представляє ємкість кисню, яка створює опір потоку

речовини та описується інерційною ланкою першого порядку зі запізненням (4):

$$W_{об}(s) = \frac{K_{об}}{T_{об}s + 1} e^{-\tau_{об}s}, \quad (4)$$

де $K_{об} = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{600 \text{ м}^3/\text{хв}}{100\%PK} = 6 \frac{\text{м}^3/\text{хв}}{\%PK}$ – коефіцієнт передачі; $T_{об} = 0,62 \text{ с}$ – стала часу; $\tau_{об} = 0,26 \text{ с}$ – запізнення. MPC-регулятор з квадратичним функціоналом при наявності обмежень розроблено за допомогою засобів пакету Matlab MPC Designer [12]. Синтез MPC-регулятора (рис. 4) було виконано використовуючи математичну модель дутьового режиму киснево-конвертерного процесу, яка описана вище.

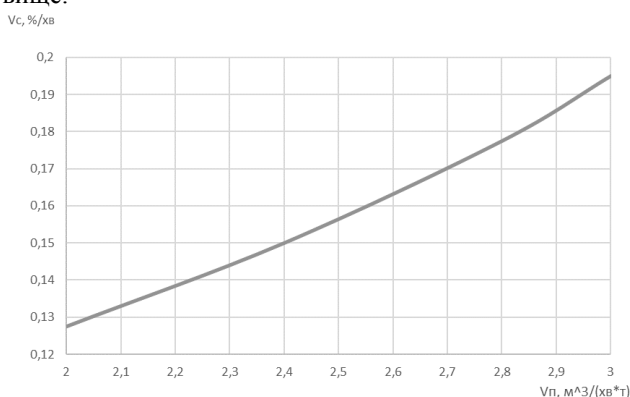


Рис. 3 – Залежність швидкості зневуглецювання від питомих витрат кисню у ванні

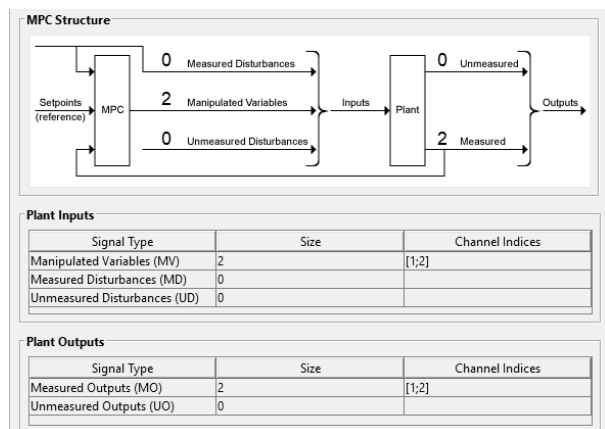


Рис. 4 – Структура модельно-прогнозуючого регулятора

Процедура моделювання виконувалась у середовищі Matlab Simulink. Було обрано алгоритм вирішення рівнянь ode23s (stiff/mod. Rosenbrock) зі зміною величиною кроку (variable-step). Абсолютна і відносна точність розрахунків – 0,0001. Структура моделі системи автоматичного регулювання киснево-конвертерним процесом з використанням MPC-стратегії наведена на рис. 5. Моделювання перехідних процесів під час продувки для 160-тонного конвертера

за алгоритмом регулювання витрати кисню, що націлений на забезпечення надійності роботи обладнання та регулювання положення фурми за енергозберігаючою технологією допалювання CO до CO₂ наведено на рис. 6.

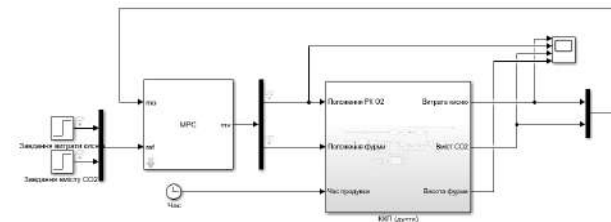


Рис. 5 – Модель системи керування на базі модельно-прогнозуючого регулятора

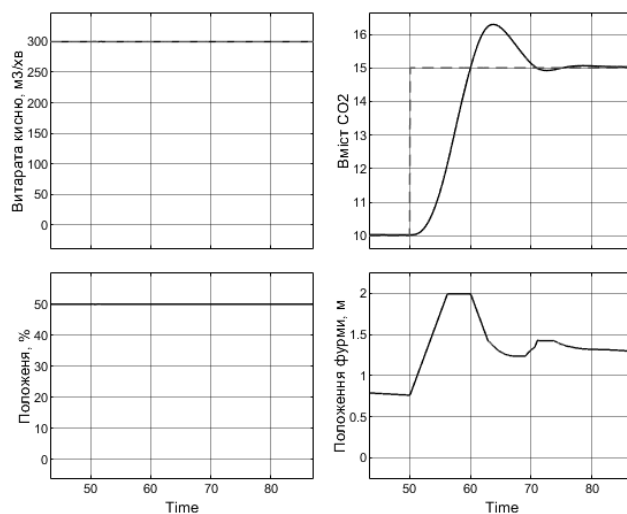


Рис. 6 – Перехідні процеси системи автоматичного регулювання параметрів дуття

На рис. 6 показані перехідні процеси системи керування з використанням модельно-прогнозуючого регулятора, в моделюванні завдання на витрату кисню встановлено 300 м³/хв, початкове завдання на вміст CO₂ – 10%, на 50-й секунді продувки завдання встановлено на рівні 15%.

Обговорення результатів

У результаті моделювання режиму продувки киснево-конвертерного процесу з використанням модельно-прогнозуючого регулятора перехідні процеси у випадку встановленого завдання на витрату кисню встановлено 300 м³/хв та зміні завдання до вміст CO₂ з 10% на 15% забезпечили показники якості наведені в табл. 1. Процес зневуглецювання є нестационарним, описується інерційною ланкою першого порядку, коефіцієнт передачі й постійна часу якої залежить від періоду плавки й тривалості продувки. За рахунок застосування MPC підходу було досягнуто динамічне відхилення в 1,2% CO₂ з показником затухання 0,99 при цьому час виходу на режимне значення складає 21 секунду.

Таблиця 1 – Показники якості САР вмісту CO₂

Показник якості	Величина
Статична похибка	0
Динамічна похибка	1,2%
Час регулювання	21 с
Показник затухання	0,99

Отримані перехідні процеси системи автоматичного регулювання киснево-конверторним процесом з використанням MPC-стратегії забезпечують вимоги поставленні до якості роботи системи.

Висновки

Показано, що при визначеному хімічному складі чавуна тепловий режим процесу залежить від швидкості зневуглецювання, що залежить від відстані фурми до рівня спокійної ванни. Процес зневуглецювання є нестационарним, описується інерційною ланкою першого порядку, коефіцієнт передачі й постійна часу якої залежить від тривалості продувки, тому застосування класичних методів є складним. Керування параметрами дутьового режиму потребує застосування сучасних методів, а саме модельно-прогнозуючого регулятора. Згідно MPC-стратегії здійснюється прогноз поведінки об'єкта, виконується оптимізація отриманої структури, в результаті якої буде знайдено оптимальне управління киснево-конверторним процесом. У модельно-прогнозуючому керуванні в якості прогнозуючої моделі використовуються системи звичайних диференціальних рівнянь. Підхід передбачає мінімізацію лінійно-квадратичного функціоналу в режимі реального часу, який характеризує якість процесу регулювання.

Список літератури

1. Basson E. *Steel Statistical Yearbook 2020 concise version*. Brussels, Belgium: Word Steel Association, 2020. 46 p.
2. Богушевский В. С., Сухенко В. Ю., Василенко Б. В. Управления конвертерной плавкой в режиме энергосберегающей технологии. *Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика : тези доп. II Всеукр. науково-практ. конф. молодих учених, спеціалістів, аспірантів* (Маріуполь, 11-12 травня 2016 р.). Маріуполь, 2016. С. 70–71.
3. Forbes M. G., Patwardhan R. S., Hamadah H., Gopaluni R. B. Model predictive control in industry: Challenges and opportunities. *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48. no. 8. P. 531–538. doi:10.1016/j.ifacol.2015.09.022.
4. Stepanets O., Mariiash Y. Analysis of influence of technical features of a pid-controller implementation on the dynamics of automated control system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3. no. 293. P. 60-69. doi: 10.15587/1729-4061.2018.132229.
5. Böhler L., Kraibl J., Görtler G., Kozek M. Fuzzy model predictive control for small-scale biomass combustion furnaces. *Applied Energy*. 2020. Vol. 276. P. 1-13. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115339.
6. Shin Y., Smith R., Hwang S. Development of model predictive control system using an artificial neural network:

- A case study with a distillation column. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 77. P. 1-14. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124124.
7. Zhang J. Optimal Control Problem of Converter Steelmaking Production Process Based on Operation Optimization Method. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2015. Vol. 2015. Article ID 483674. 13 pages. doi: 10.1155/2015/483674.
 8. Backman J., et al. Methods and Tools of Improving Steel Manufacturing Processes: Current State and Future Methods. *International Federation of Automatic Control PapersOnLine*. 2019. Vol. 52(13). P. 1174–1179. doi:10.1016/j.ifacol.2019.11.355.
 9. Богушевский В. С., Зубока К. М. Математичне моделювання конвертерного процесу за енергозберігаючою технологією. *Технологічні комплекси*. 2013. 2. С. 32-38.
 10. Stepanets O., Mariiash Y. Model predictive control application in the energy saving technology of basic oxygen furnace. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2020. Vol. 10. no. 2. P. 70-74. doi: 10.35784/iapgos.931.
 11. Bogushevskiy V. S., et al. System for the BOF Process Control. *The advanced Science open access Journal*. 2013. Vol. 5. P. 23-27.
 12. MathWorks. Design Controller Using MPC Designer. URL: <https://www.mathworks.com/help/mpc/gs/introduction.html?ue>. (accessed 01.11. 2021).

References (transliterated)

1. Basson E. *Steel Statistical Yearbook 2020 concise version*. Brussels, Belgium. Word Steel Association, 2020. 46 p.
2. Bohushevskiy V. S., Sukhenko V. Yu., Vasilenko B. V. Upravleniya konvertternoy plavkoi v rezhyme energhosberehaiushchei tekhnolohyy [Converter smelting control in energy-saving technology mode]. *Problemy energhoresursozberezhennia v promyslovomu rehioni. Nauka i praktyka: tezy dop. II Vseukr. naukovo-prakt. konf. molodykh uchenykh, spetsialistiv, aspirantiv* (Mariupol, 11-12 travnia 2016 r.) [Problems of energy saving in the industrial region. Science and practice: thesis II All-Ukrainian scientific-practical conf. young scientists, specialists, graduate students (Mariupol, May 11-12, 2016)]. Mariupol, 2016, pp. 70-71.
3. Forbes M. G., Patwardhan R. S., Hamadah H., Gopaluni R. B. Model predictive control in industry: Challenges and opportunities. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, Vol. 48, no. 8, pp. 531–538, doi:10.1016/j.ifacol.2015.09.022.
4. Stepanets O., Mariiash Y. Analysis of influence of technical features of a pid-controller implementation on the dynamics of automated control system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, Vol. 3, no. 293, pp. 60-69, doi: 10.15587/1729-4061.2018.132229.
5. Böhler L., Kraibl J., Görtler G., Kozek M. Fuzzy model predictive control for small-scale biomass combustion furnaces. *Applied Energy*, 2020, Vol. 276, pp. 1-13, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115339.
6. Shin Y., Smith R., Hwang S. Development of model predictive control system using an artificial neural network: A case study with a distillation column. *Journal of Cleaner Production*, 2020, Vol. 77, pp. 1-14, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124124.
7. Zhang J. Optimal Control Problem of Converter Steelmaking Production Process Based on Operation Optimization Method. *Discrete Dynamics in Nature and*

- Society*, 2015, Vol. 2015, Article ID 483674, 13 pages, doi: 10.1155/2015/483674.
8. Backman J., et al. Methods and Tools of Improving Steel Manufacturing Processes: Current State and Future Methods. *International Federation of Automatic Control Papers OnLine*, 2019, Vol. 52(13), pp. 1174–1179, doi:10.1016/j.ifacol.2019.11.355.
 9. Bohushevskiy V. S., Zuboka K. M. Matematychni modeliuvannya konverternogo protsesu za enerhozberihaiuchoiu tekhnolohiieiu [Mathematical modeling of the converter process by energy-saving technology]. *Technological complexes*, 2013, Vol. 2, p. 32-38.
 10. Stepanets O., Mariash Y. Model predictive control application in the energy saving technology of basic oxygen furnace. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 2020, Vol. 10, no. 2, pp. 70-74, doi: 10.35784/iapgos.931.
 11. Bogushevskiy V. S., et al. System for the BOF Process Control. *The advanced Science open access Journal*, 2013, Vol. 5, pp. 23-27.
 12. MathWorks. Design Controller Using MPC Designer. Available at: <https://www.mathworks.com/help/mpc/gs/introduction.html?ue>. (accessed 1.11. 2021).

Відомості про авторів (About authors)

Степанець Олександр Васильович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів; м. Київ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4444-0705>; e-mail: stepanets.av@gmail.com.

Stepanets Oleksandr – Ph. D., Docent, associate professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Heat power engineer department, АТЕР, Kyiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4444-0705>; e-mail: stepanets.av@gmail.com.

Маріяш Юрій Ігорович – аспірант, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0812-8960>; e-mail: mariahyuriy@gmail.com.

Mariash Yuriy – Ph. D. Student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Heat power engineer department, АТЕР, Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0812-8960>; e-mail: mariahyuriy@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Степанець О. В., Маріяш Ю. І. Модельно-прогнозуючий регулятор дутьєвого режиму киснево-конвертерного процесу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 61-66. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.08.

Please cite this article as:

Stepanets O., Mariash Y. A model predictive controller of the blowing mode during basic oxygen furnace process. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4 (10), pp. 61-66, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.08.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Степанец А. В., Маріяш Ю. И. Модельно-прогнозирующий регулятор дутьевого режима кислородно-конвертерного процесса. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 61-66. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.08.

АННОТАЦІЯ На сьогоднішній день в Україні і мирі актуальна проблема енергосбереження і зниження стоимости виплавленної сталі. Металургічні підприємства розвиваються в умовах жорсткої конкуренції, основною причиною – українська продукція незвичайно енергоємна із-за износу основних фондів і застарілих технологічних процесів. Кислородно-конвертерний процес – це процес виробництва сталі із рідкого чугуна з додаванням сталюго лома в конвертер і продувкою киснем зверху через водоохладжающую фурму. Сьогодні отримання сталі з допомогою кислородно-конвертерного процесу являється найбільш популярним в світі і набуває все більшого поширення. Основним недоліком кислородно-конвертерного процесу являється необхідність надання початкового кількості тепла (в формі рідкого чугуна) і як наслідок – обмеження в переробці металічного лома. Зниження собівартості кислородно-конвертерної сталі досягається за рахунок збільшення частки металлолома за рахунок збільшення ступеня дозигання CO до CO₂ в порожнині конвертера шляхом оптимального управління параметрами дутьєвого режиму з використанням модельно-прогнозованого управління. Принцип модельно-прогнозованого управління оснований на математичній моделі об'єкта. Такий підхід мінімізує функціонал, що характеризує якість процесу. Як якість функціоналу був вибрано лінійно-квадратичний функціонал. Представлено прогнозирующую модель з урахуванням обмежень на зміну положення фурми і пневматичного клапана подачі кисню. Встановлено, що зміна швидкості обезуглероживания металу залежить від відстані фурми до рівня спокійної ванни і впливає на ступінь дозигання CO до CO₂. Процес обезуглероживания являється нестационарним, описується аперіодическим звуком першого порядку, коефіцієнт передачі і постійне час залежить від періоду плавки і тривалості продувки. Удосконалена математична модель дутьєвого режиму кислородно-конвертерної плавки, за рахунок урахування впливу інтенсивності дутья на процес обуглецивания ванни, що дозволило підвищити точність і якість управління дутьем в умовах зміни витрати кисню во время продувки. Результати моделювання системи автоматичного управління показують, що модельно-прогнозуемый регулятор забезпечує потрібний рівень вуглекислого газу в конвертерних газах при зміні витрати кисню на продувку.

Ключевые слова: модельно-прогнозируемое управление; оптимальное управление; линейно-квадратичный функционал; кислородно-конвертерный процесс; модель в пространстве состояний

Надійшла (received) 26.11.2021

УДК 679.7:678:544

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.09

В'ЯЗКОПРУЖНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНОЇ КОМПОЗИЦІЇ, ЩО НЕ МІСТИТЬ ГАЛОГЕНІВ, ДЛЯ КАБЕЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ

О. В. ЧУЛЄЄВА*, В. М. ЗОЛОТАРЬОВ, В. Л. ЧУЛЄЄВ, Т. А. КУЛЕШОВА, М. С. СУСЛІН

Приватне акціонерне товариство «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: echuleeva@ukr.net

АНОТАЦІЯ Досліджено в'язкопружні властивості полімерної композиції, що не містить галогенів, для кабельної продукції. Визначено вплив температурних параметрів, швидкості зсуву на коефіцієнт розбухання полімерної композиції, досліджено залежності густини розплаву від температури. Полімерна матриця є сумішшю поліолефінів (лінійний поліетилен низької густини; поліолефіновий еластомер та модифікований малеїновим ангідридом лінійний поліетилен низької густини), як наповнювач антипірен для полімерної композиції – тригідрат оксиду алюмінію. Вміст наповнювача-антипірену в полімерній композиції становить 60 %. Полімерну композицію виготовляли на лінії компаундування компанії X-Compound, Швейцарія. Дослідження густини розплаву та коефіцієнту розбухання полімерної композиції проводили на капілярному віскозиметрі типу ИИРТ-АМ. Для визначення густини розплаву використовували співвідношення довжини капіляру до діаметру $L/D=8/2$. Результати дослідження залежності густини розплаву полімерної матриці від температури 150–190°C за різного навантаження показали, що цей параметр знижується від 789 до 744 $кг/м^3$, а для полімерної композиції від 1309 до 1268 $кг/м^3$. Коефіцієнт розбухання у разі підвищення швидкості зсуву за температур 150–190°C для полімерної матриці збільшується від 1,102 до 1,520, а для полімерної композиції зменшується від 1,056 до 1,018. Дослідження залежності коефіцієнту розбухання полімерної матриці та полімерної композиції від співвідношення довжини формуючого інструменту до діаметру вказують на те, що коефіцієнт розбухання для полімерної матриці знижується від 1,296 до 1,152, а для полімерної композиції від 1,045 до 1,01. Встановлено, що на в'язкопружні властивості полімерної композиції, що не містить галогенів, суттєво впливають: температурні параметри переробки, швидкість зсуву, густина розплаву, співвідношення довжини формуючого інструменту до діаметру. Результати досліджень дають можливість обґрунтовано підходити до визначення технологічних параметрів виготовлення ізоляції, оболонок силових кабелів та оптичних кабелів мікромодульної конструкції. Це також дозволить швидко вносити коригування у геометричні параметри формуючого інструменту кабельних головок.

Ключові слова: коефіцієнт розбухання; швидкість зсуву; температура; густина розплаву; капілярний віскозиметр

THE VISCOELASTIC PROPERTIES OF A HALOGEN-FREE POLYMER COMPOSITION FOR CABLE PRODUCTS

O. CHULIEIEVA, V. ZOLOTARYOV, V. CHULIEIEV, T. KULESHOVA, M. SUSLIN

Private joint stock company "YUZHicable WORKS", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The viscoelastic properties of a halogen-free polymer composition for cable products have been investigated. The influence of temperature parameters, shear rate on the die-swell ratio of the polymer composition has been determined; the dependence of the melt density on a temperature was investigated. The polymer matrix is a mixture of polyolefins (linear low density polyethylene; polyolefin elastomer and maleic anhydride modified linear low density polyethylene) as a flame retardant filler for the polymer composition is trihydrate alumina. The content of flame retardant filler in the polymer composition is 60 %. The polymer composition was manufactured on the compounding line of X-Compound, Switzerland. The investigation of both melt density and die-swell ratio of the polymer composition has been conducted with help of capillary viscometer type ИИРТ-АМ. To determine the density of the melt the ratio of capillary length to diameter $L/D=8/2$ was used. The results of the study of the dependence of the melt density of the polymer matrix from a temperature of 150–190 °C at different loads showed that this parameter decreases from 789 to 744 kg/m^3 and for polymer composition from 1309 to 1268 kg/m^3 . The die-swell ratio in the case of an increase of the shear rate at temperatures of 150–190°C for the polymer matrix increases from 1,102 to 1,520, and for the polymer composition decreases from 1,056 to 1,018. The investigation results of the dependence of both die-swell ratio of the polymer matrix and the polymer composition on the ratio of the length of the forming tool to the diameter indicates that the die-swell ratio for the polymer matrix was reduced from 1,296 to 1,152, and for the polymer composition from 1,045 to 1,01. It was established that the viscoelastic properties of the halogen-free polymer composition are significantly influenced by: processing temperature, shear rate, melt density, the ratio of the length of the forming tool to the diameter. The research results give a possibility for a reasonable approach for the determination of technological parameters of an insulation, sheathing of power cables and optical cables of microtube construction. It will also allow to quickly adjust the geometrical parameters of the forming tool of cable heads.

Keywords: die-swell ratio; shear rate; temperature; melt density; capillary viscometer

Вступ

Наразі розширення асортименту полімерних матеріалів відбувається не стільки за рахунок розробки нових полімерів, скільки у результаті

модифікації відомих, під час якої отримання полімерних матеріалів з певним комплексом властивостей може бути пов'язано зі змінами хімічної будови макромолекул полімеру, і відповідно, його надмолекулярної структури [1,2].

Більшу частину властивостей полімерів можна покращити, використовуючи різні підсилюючі волокна, целюлозу у формі часток, та наповнювачі антипірени для застосування матеріалів у широкому діапазоні [3]. Створення полімерних композиційних матеріалів, що не містять галогенів для кабельної продукції досягається за рахунок уведення в базовий полімер антипіренів – гідроксидів металів [4,5].

Додавання наповнювачів-антипіренів до полімеру може бути причиною змін умов переробки та реологічних властивостей полімеру. Реологічні властивості розплаву полімерів є важливими показниками технологічного режиму під час переробки та можуть впливати на всі етапи використання матеріалу, від створення полімерних композицій до виготовлення продукту. Реологічні вимірювання досить чутливі до змін молекулярної структури. Полімерні матеріали під навантаженням проявляють одночасно, як в'язкий так і пружні характеристики. Пружний компонент пов'язаний з властивостями матеріалу накопичувати та виділяти енергію, щоб повернутися в вихідну будову, коли знімають навантаження, під яким виникла деформація, в той час як в'язкий компонент пов'язаний з втратою енергії та перетворюється в тепло від прикладеного навантаження. Характеристики розплаву полімеру, такі як в'язкопружність та густина розплаву, є дуже важливими властивостями у галузі екструзії полімерів [6].

Пружність – це властивість полімеру стискатися та розширяться. Ефект розбухання у філь'єрі називають в літературі розбуханням екструдату, ефектом Баруса або розбуханням після екструзії, є одним з важливих проявів пружності розплаву. Коли розплавлені полімери продавлюються під впливом напруження зсуву через філь'єру, екструдат розбухає та стає більше за розмір філь'єри. Під час переробки полімерів це проявляється у вигляді «шкури акули», пристінного проковзування, розриву розплаву. Багато дослідників намагалися показати, що причина нестабільності потоку пов'язана з в'язкопружними властивостями [7,8]. Наприклад, під час екструдування труби з поліолефіну поверхня труби починає втрачати свій глянцекий вигляд. Замість цього з'являється матова поверхня, та за вищих швидкостей зсуву на поверхні з'являються періодичні дефекти, як то «шкура акули» або розрив поверхні розплаву. Ймовірно, ці явища мають безпосереднє відношення до процесів переробки полімерів, так як вони обмежують продуктивність технологічного процесу, а також знижують якість виробів. У дослідженні [9] стверджують про лінійне збільшення розбухання екструдату зі збільшенням напруження зсуву для сумішей ПО, в той час як воно зменшується зі збільшенням відношення довжини філь'єри до діаметру та зі збільшенням температури.

На розбухання екструдату впливає багато факторів, такі як основні властивості полімеру: молекулярна маса, молекулярно-масовий розподіл, ступінь розгалуження, полідисперсність; умови технологічного процесу, такі як швидкість зсуву, напруження зсуву, розмір капіляру та температура розплаву. В публікаціях [7,10-13] також зазначають вплив наповнювачів на розбухання екструдату.

Густина розплаву є значним параметром який контролюється в процесі переробки полімерів, особливо під час екструзії. Об'єм полімеру суттєво змінюється через велику кількість фазових або структурних перетворень між твердою фазою, плавленням, склуванням, а також залежить від температури, тиску та багатьох інших факторів. В промисловості завжди був великий інтерес до моделювання умов процесу, кінцевої форми виробу та прогнозування розбухання полімеру. Густина розплаву в залежності від температури та тиску часто має важливе значення для різних процесів проектування, наприклад, конструкції шнеку екструдера та формуючого інструменту [14,15].

Наведені дослідження показують, що властивості полімерних композицій залежать не лише від їхнього складу, але в значній мірі від умов їхньої переробки. Однак, багато запитань, які пов'язані зі зміною коефіцієнтів розбухання та густини розплаву полімерних композицій, що не містять галогенів, у процесі переробки (виготовленні кабельної продукції) все ще недостатньо вивчені.

Мета роботи

Дослідження в'язкопружних властивостей полімерної матриці та полімерної композиції, що не містить галогенів, для кабельної продукції.

Визначення впливу швидкості зсуву, температурних параметрів на коефіцієнт розбухання полімерної композиції, визначення залежності густини розплаву від температури.

Матеріали

Досліджували пожегобезпечну полімерну композицію, що не містить галогенів. Як полімерну матрицю використано суміш поліолефінів (лінійний поліетилен низької густини; поліолефіновий еластомер та модифікований малеїновим ангідридом лінійний поліетилен низької густини). Тригідрат оксиду алюмінію як наповнювач-антипірену. Вміст наповнювача-антипірену в полімерній композиції становить 60 %.

Полімерну композицію виготовляли на лінії компаундування компанії X-Compound, Швейцарія. До складу лінії входить наступне обладнання: компаундер/змішувач 120-16 L/D, екструдер що подає GS 140-6 L/D з гранулюючою головкою, система дозування інгредієнтів, транспортні системи інгредієнтів і готової продукції, система охолодження гранул.

Обладнання та методика

Дослідження густини розплаву та коефіцієнту розбухання полімерної композиції проводили на капілярному віскозиметрі типу ИИРТ-АМ (рис. 1). Діаметр циліндру $9,550 \pm 0,007$, довжина 150 мм.

Для визначення густини розплаву використовували співвідношення довжини капіляру до діаметру $L/D=8/2$. Гранульовану композицію завантажували до циліндру та продавливали з навантаженням 98,07; 122,59; 211,82 Н за температур 150°C, 170°C, 190°C.

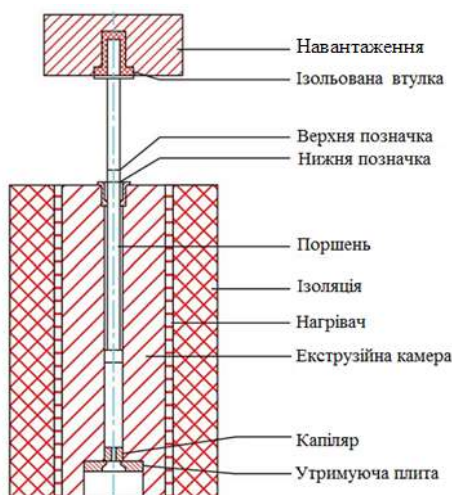


Рис. 1 – Схематичне зображення капілярного віскозиметру типу ИИРТ-АМ відповідно до ASTM D1238-13

Відрізки матеріалу витримували за температури навколишнього середовища 72 год. Масу визначали на аналітичних вагах Mettler Toledo з точністю до 0,01 мг та проводили розрахунок за формулою (1):

$$\rho_m = \frac{4m}{\pi \cdot h \cdot d_r^2} \quad (1)$$

де m – маса відрізка матеріалу; h – переміщення поршню під час продавлення одного відрізка матеріалу; d_r^2 – діаметр поршню $9,4742 \pm 0,0076$ мм.

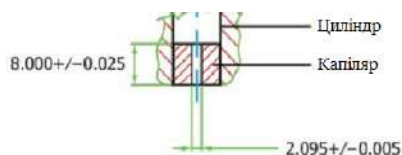


Рис. 2 – Схематичне зображення формуючого капіляру для ИИРТ-АМ відповідно до ASTM D1238-13

Під час дослідження коефіцієнту розбухання полімерної композиції використовували співвідношення довжини капіляру до діаметру (L/D) від 4 до 12. Композицію продавливали за

навантаженням від 37,24 до 211,82 Н за температур від 150°C до 190°C. Відрізки матеріалу витримували за температури навколишнього середовища 72 год. Діаметр відрізків вимірювали цифровим мікрометром з точністю до 0,01 мікрон. Розрахунок коефіцієнта розбухання проводився за наступною формулою (2):

$$B = \frac{d_j}{D} \quad (2)$$

де d_j – діаметр відрізка матеріалу; D – діаметр капіляра $2,095 \pm 0,005$ мм (рис 2).

Статистичний аналіз був виконаний методом дисперсного аналізу (ANOVA) з використанням загальної лінійної моделі, а також моделі асимптотичної регресії за інтегральним алгоритмом Левенберга–Марквардта із рівнем значущості α 0,05. Аналіз даних виконувався за допомогою OriginPro 2017 компанії Origin Lab.

Результати досліджень

Результати дослідження залежності густини розплаву полімерної матриці від зміни величини навантаження наведено на рис. 3.

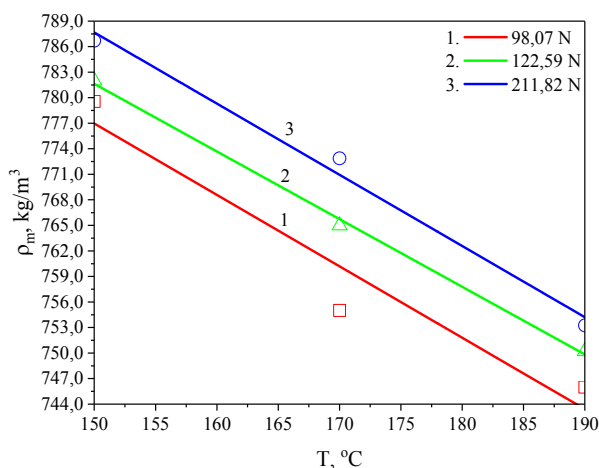


Рис. 3 – Залежність густини розплаву полімерної матриці від температури за різного навантаження

З отриманих даних видно, що густина полімерної матриці знижується під час підвищення температури від 150°C до 190°C з 789 кг/м³ до 744 кг/м³. Також густина розплаву полімерної матриці суттєво підвищується у разі збільшення навантаження. Для навантаження 98,07 Н вона змінюється від 777 кг/м³ до 744 кг/м³, а за навантаження 211,82 Н від 788 кг/м³ до 754 кг/м³.

Видно, що густина розплаву полімерної матриці мало залежить від зміни температури та навантаження. Криві на графіку мають лінійний характер та описуються рівняннями регресії:

для кривої 1 $y = 900,89 - 0,79x$;

для кривої 2 $y = 902,85 - 0,84x$;

для кривої 3 $y = 903,15 - 0,84x$.

Дослідження залежності густини розплаву полімерної композиції від зміни величини навантаження наведено на рис. 4. Густина полімерної композиції знижується під час підвищення температури від 150 °С до 190 °С з 1312 кг/м³ до 1260 кг/м³. Також густина розплаву полімерної композиції суттєво підвищується у разі збільшення навантаження. Для навантаження 98,07 Н вона змінюється від 1284 кг/м³ до 1268 кг/м³, а за навантаження 211,82 Н від 1309 кг/м³ до 1280 кг/м³.

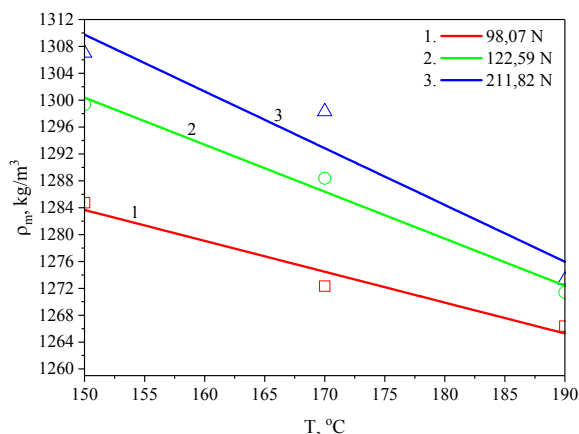


Рис. 4 – Залежність густини розплаву полімерної композиції від температури за різного навантаження

З аналізу даних видно, що полімерна композиція в порівнянні з полімерною матрицею має ширший інтервал зниження густини розплаву з підвищенням температури. Це пов'язано зі зміною надмолекулярної структури наповненої полімерної композиції, впливом дисперсності та складу наповнювача-антипірену. Криві на графіку мають лінійний характер та описуються рівняннями регресії:

для кривої 1 $y = 1352,58 - 0,46x$;

для кривої 2 $y = 1405,31 - 0,70x$;

для кривої 3 $y = 1436,46 - 0,85x$

Дослідження залежності коефіцієнту розбухання полімерної матриці та полімерної композиції від швидкості зсуву за різної температури та різного співвідношення довжини формуючого інструменту до діаметру наведено на рис. 5, 6.

З отриманих даних видно (див. рис. 5), що для полімерної матриці спостерігається стрімке збільшення коефіцієнту розбухання зі збільшенням швидкості зсуву, особливо за температури 150 та 170 °С (крива 1, 3). Для кривої 1 коефіцієнт розбухання збільшується від 1,24 до 1,520, а для кривої 3 від 1,178 до 1,44. За температури 190 °С (крива 5) збільшення коефіцієнту розбухання є не дуже значним (від 1,19 до 1,26), під час досягнення швидкості зсуву 95 с⁻¹ крива виходить на плато і коефіцієнт розбухання вже не залежить від зміни швидкості зсуву.

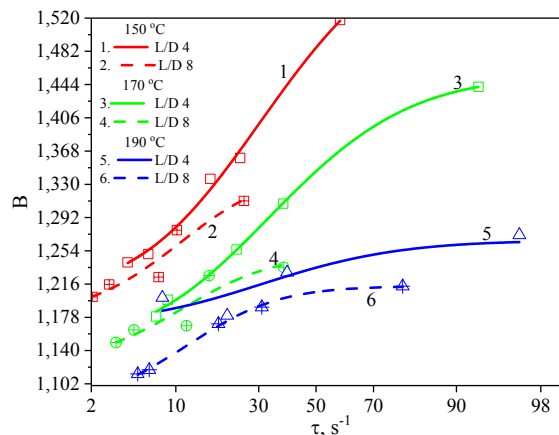


Рис. 5 – Залежність коефіцієнту розбухання полімерної матриці від швидкості зсуву за різної температури та різного співвідношення довжини формуючого інструменту до діаметру

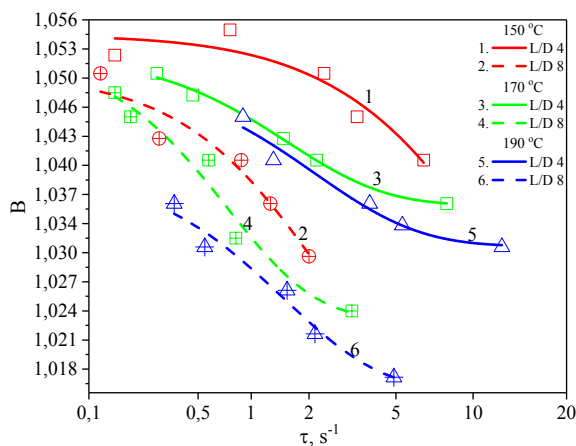


Рис. 6 – Залежність коефіцієнту розбухання полімерної композиції від швидкості зсуву за різної температури та співвідношення довжини формуючого інструменту до діаметру

У разі збільшення співвідношення довжини формуючого інструменту до діаметру (L/D) 8, коефіцієнт розбухання за температур 150 та 170 °С має не великий діапазон збільшення від 1,20 до 1,3 (крива 2) та від 1,148 до 1,235 (крива 4). За температури 190 °С (крива 6) спостерігається суттєве збільшення коефіцієнту розбухання від 1,11 до 1,178. Під час досягнення швидкості зсуву 60 с⁻¹ коефіцієнт розбухання стала величина, тобто не залежить від зміни швидкості зсуву.

Криві на рис. 5 описуються рівняннями регресії:

для кривої 1 $y = 1,74 - 0,53 \cdot 0,98^x$;

для кривої 2 $y = 1,34 - 0,16 \cdot 0,94^x$;

для кривої 3 $y = 1,58 - 0,44 \cdot 0,99^x$;

для кривої 4 $y = 1,25 - 0,13 \cdot 0,94^x$;

для кривої 5 $y = 1,29 - 0,12 \cdot 0,98^x$;

для кривої 6 $y = 1,21 - 0,13 \cdot 0,94^x$.

Для полімерної композиції криві на графіку (рис. 6) мають протилежний характер в порівнянні з кривими для полімерної матриці (рис. 5), коефіцієнти розбухання зменшуються від 1,055 до 1,018 зі збільшенням швидкості зсуву. Оскільки композиція має великий вміст наповнювача, то спостерігається значне зниження швидкості зсуву у порівнянні з полімерної матрицею.

За температури 150°C можна спостерігати значне зниження коефіцієнту розбухання в діапазоні усіх швидкостей зсуву від 1,055 до 1,04 (крива 1) та від 1,048 до 1,03 (крива 2). За температури 170°C (крива 3) спостерігається зниження коефіцієнту розбухання, під час досягнення швидкості зсуву 7 с⁻¹ крива виходить на плато і коефіцієнт вже не залежить від зміни швидкості зсуву. Коефіцієнти розбухання змінюються від 1,049 до 1,036 (крива 3), та від 1,048 до 1,024 (крива 4).

Для кривих 5 та 6 за температури 190°C спостерігається збільшення швидкості зсуву та зменшення діапазону коефіцієнту розбухання від 1,044 до 1,031 для L/D=8/2 та з 1,034 до 1,017 для L/D=16/2. Крива 5 під час досягнення швидкості зсуву 10 с⁻¹ виходить на плато і коефіцієнт вже не залежить від зміни швидкості зсуву. Можна зробити припущення, що за температури 190 °C за L/D=16/2 (крива 6) та швидкості зсуву більше 5 с⁻¹ коефіцієнт розбухання буде менше змінюватися. Криві на графіку описуються рівняннями регресії:

$$\text{для кривої 1 } y = -0,20 + 1,25 \cdot 0,99^x;$$

$$\text{для кривої 2 } y = 1,01 + 0,04 \cdot 0,70^x;$$

$$\text{для кривої 3 } y = 1,04 + 0,02 \cdot 0,57^x;$$

$$\text{для кривої 4 } y = 1,02 + 0,03 \cdot 0,30^x;$$

$$\text{для кривої 5 } y = 1,03 + 0,02 \cdot 0,67^x;$$

$$\text{для кривої 6 } y = 1,01 + 0,02 \cdot 0,56^x.$$

Для того, щоб визначити залежність коефіцієнту розбухання від температури були побудовані графіки (рис. 7, 8), де швидкість зсуву не змінна в залежності від співвідношення довжини формуючого інструменту до діаметру.

На рис. 7 спостерігається значне зниження коефіцієнту розбухання в температурному діапазоні 150 – 190 °C від 1,28 – 1,18 (крива 1) та 1,26 – 1,37 (крива 2).

Для полімерної композиції (рис. 8) також зберігається тенденція до зниження коефіцієнту розбухання як і для полімерної матриці, але він більш залежить від співвідношення довжини формуючого інструменту до діаметру. За температур 150 – 190 °C (крива 1) коефіцієнт розбухання зменшується від 1,051 до 1,041, на кривій 2 – від 1,033 до 1,025.

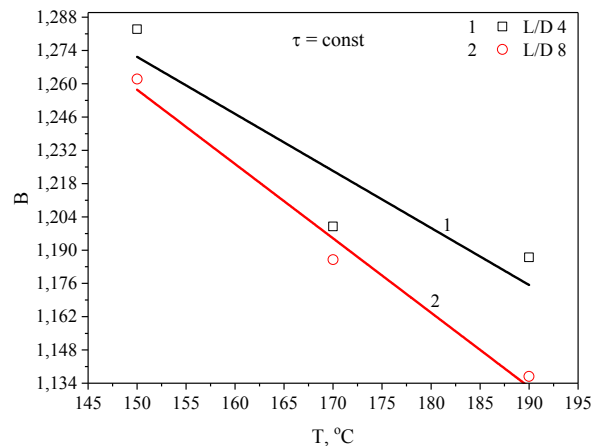


Рис. 7 – Залежність коефіцієнту розбухання полімерної матриці від температури за швидкості зсуву 10 с⁻¹ та різного співвідношення довжини формуючого інструменту до діаметру

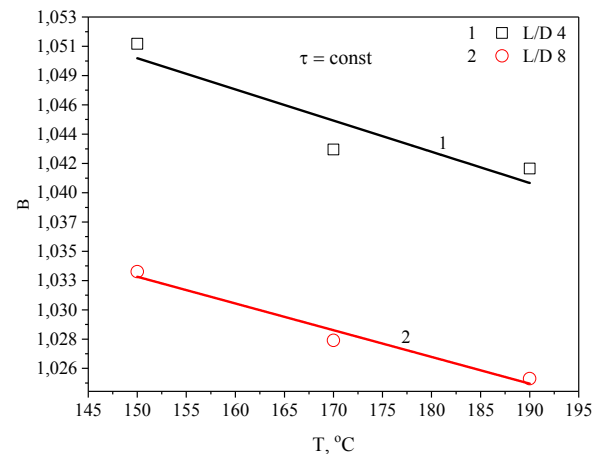


Рис. 8 – Залежність коефіцієнту розбухання полімерної композиції від температури за швидкості зсуву 1,5 с⁻¹ та різного співвідношення довжини формуючого інструменту до діаметру

Були побудовані залежності коефіцієнту розбухання полімерної матриці від співвідношення довжини формуючого інструменту за різного навантаження (рис. 9, 10).

Для кривої 1 (рис. 9) спостерігається зниження коефіцієнту розбухання від 1,2 до 1,14.

Для кривої 2 коефіцієнт розбухання становить сталу величину після L/D=16/2 за навантаження 49,03 Н, при цьому коефіцієнт розбухання зменшується від 1,23 до 1,18.

Для вищих навантажень 98,07 Н, 122,82 та 211,82 Н (криві 3, 4, 5) спостерігається зменшення діапазону значень коефіцієнту розбухання від 1,28 до 1,21 для всіх значень співвідношення довжини формуючого інструменту до діаметру.

На кривій 3 коефіцієнт розбухання становить сталу величину після L/D 9, на кривій 4 – L/D 11, на кривій 5 – L/D 11,5.

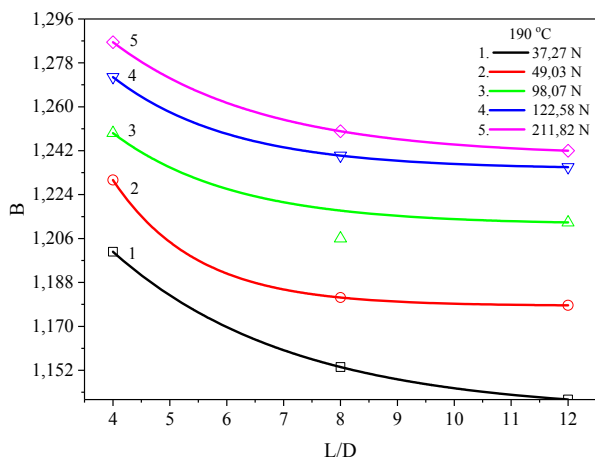


Рис. 9 – Залежність коефіцієнту розбухання полімерної матриці від співвідношення довжини формуючого інструменту до діаметру за різного навантаження

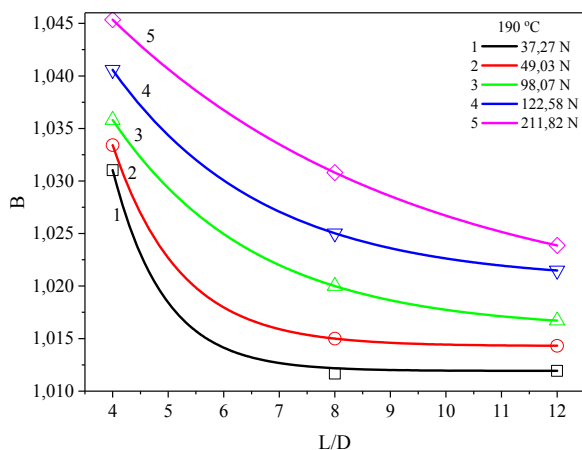


Рис. 10 – Залежність коефіцієнту розбухання полімерної композиції від співвідношення довжини формуючого інструменту до діаметру за різного навантаження

Криві на рис. 9 описуються рівняннями регресії:

$$\text{для кривої 1 } y = 1,14 + 0,23 \cdot 0,72^x;$$

$$\text{для кривої 2 } y = 1,18 + 0,78 \cdot 0,50^x;$$

$$\text{для кривої 3 } y = 1,21 + 0,25 \cdot 0,63^x;$$

$$\text{для кривої 4 } y = 1,23 + 0,26 \cdot 0,62^x;$$

$$\text{для кривої 5 } y = 1,24 + 0,21 \cdot 0,68^x.$$

Для полімерної композиції (рис. 10) також спостерігається зниження коефіцієнту розбухання від співвідношення довжини формуючого інструменту, але більш у вузькому діапазоні ніж з полімерна матриця. Так для кривої 1, 2 зменшення коефіцієнту розбухання спостерігається від 1,03 до 1,01. Водночас вихід на плато як для кривої 1 так і для 2 спостерігається після $L/D=16/2$. За вищих навантажень (криві 3, 4, 5) зменшення коефіцієнту розбухання спостерігається від 1,045 до 1,01.

Криві на рис. 10 описуються рівняннями регресії:

$$\text{для кривої 1 } y = 1,01 + 1,43 \cdot 0,34^x;$$

$$\text{для кривої 2 } y = 1,01 + 0,52 \cdot 0,44^x;$$

$$\text{для кривої 3 } y = 1,02 + 0,10 \cdot 0,68^x;$$

$$\text{для кривої 4 } y = 1,02 + 0,09 \cdot 0,69^x;$$

$$\text{для кривої 5 } y = 1,02 + 0,06 \cdot 0,83^x.$$

Висновки

Таким чином, на в'язкопружні властивості полімерної композиції, що не містить галогенів, суттєво впливають: температурні параметри переробки, швидкість зсуву, густина розплаву, співвідношення довжини формуючого інструменту до діаметру.

Отримані рівняння регресії на основі статистичної обробки експериментальних даних методом дисперсного аналізу (ANOVA), що описують залежності: густина розплаву від температури; коефіцієнту розбухання від швидкості зсуву; коефіцієнту розбухання від температури; коефіцієнту розбухання від співвідношення довжини формуючого інструменту до діаметру.

Результати досліджень дають можливість обґрунтовано підходити до визначення технологічних параметрів виготовлення ізоляції, оболонки силових кабелів та оптичних кабелів мікромодульної конструкції. Це також дозволить швидко вносити коригування в геометричні параметри формуючого інструменту кабельних головок.

Список літератури

- Mehrjerdi A. K., Adl-Zarrabi B., Cho S.-W. Mechanical and thermophysical properties of high-density polyethylene modified with talc // *Journal of Applied Polymer Science*. 2013. Iss. 129 (4). P. 2128–2138. doi:10.1002/app.38945.
- Yu F., Liu T., Zhao X. Effects of talc on the mechanical and thermal properties of polylactide. *Journal of Applied Polymer Science*. 2012. Iss. 125 (S2). P. 99–109. doi:10.1002/app.36260.
- Scholten P. B. V., Ozen M. B., Soyler Z. Rheological and mechanical properties of cellulose/LDPE composites using sustainable and fully renewable compatibilisers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. 48744. P. 1–9. doi:10.1002/app.48744.
- Тирелли Д. Антипирени для композитов. *The Chemical Journal*. 2013. № 1–2. P. 42–45.
- Chulieva, O. Effect of flame retardant fillers on the rheological properties of composite materials of ethylene-vinyl acetate copolymer. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. Vol. 4/1(88). P. 32–37. doi:10.15587/1729-4061.2017.108187.
- Spoerk M., Holzer C., Gonzalez-Gutierrez J. Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: a review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. Iss. 137 (12). 48545. P. 1–16. doi:10.1002/app.48545.

7. Liang J. Z. Effects of extrusion conditions on die-swell behavior of polypropylene/diatomite composite melts. *Polymer Testing*. 2008. Vol. 27 (8). P. 936–940. doi:10.1016/j.polymertesting.2008.08.001.
8. Cyriac F., Covas J., Hilliou L. Predicting extrusion instabilities of commercial polyethylene from non-linear rheology measurements. *Rheologica Acta*. 2014. Vol. 53. Iss. 10–11. P. 817–829. doi:10.1007/s00397-014-0798-7.
9. Liang J.-Z. The elastic behavior during capillary extrusion of LDPE/LLDPE blend melts. *Polymer Testing*. 2002. Iss. 21 (1). P. 69–74. doi:10.1016/s0142-9418(01)00050-2.
10. Liang J.-Z., Yang J., Tang C.-Y. Die-swell behavior of PP/Al(OH)₃/Mg(OH)₂ flame retardant composite melts. *Polymer Testing*. 2010. Iss. 29 (5). P. 624–628. doi:10.1016/j.polymertesting.2010.03.014.
11. Kazatchkov I. B., Hatzikiriakos S. G., Bohnet N. Influence of molecular structure on the rheological and processing behavior of polyethylene resins. *Polymer Engineering & Science*. 1999. Iss. 39 (4). P. 804–815. doi:10.1002/pen.11468.
12. Liang J.-Z. Melt die-swell behavior of polyoxymethylene blended with ethylene-vinyl acetate copolymer and high-density polyethylene. *Polymer Testing*. 2018. Iss. 68. P. 213–218. doi:10.1016/j.polymertesting.2018.04.011.
13. Ansari M., Inn Y. W., Sukhadia A. M. Wall slip of HDPEs: molecular weight and molecular weight distribution effects. *Journal of Rheology*. 2013. Iss. 57 (3). P. 927–948. doi:10.1122/1.4801758.
14. Liang J.-Z., He L. Melt flow properties and melt density of POM/EVA/HDPE nanocomposites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2011. Iss. 50 (13). P. 1338–1343. doi:10.1080/03602559.2011.584235.
15. Liang J.-Z., Tang C.-Y., Zhou L. Melt density and flow property of PDLLA/nano-CaCO₃ bio-composites. *Composites Part B Engineering*. 2011. Iss. 42 (7). P. 1897–1900. doi:10.1016/j.compositesb.2011.06.011.
16. *Applied Polymer Science*, 2020, 48744, pp. 1–9, doi:10.1002/app.48744.
17. Tirelli Diyeago Antipireny dlya kompozitov [Flame retardants for composites] *The Chemical Journal*, 2013, no. 1-2, pp. 42–45.
18. Chulieieva O. Effect of flame retardant fillers on the rheological properties of composite materials of ethylene-vinyl acetate copolymer. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2017, Vol. 4/1(88), pp. 32–37, doi:10.15587/1729-4061.2017.108187.
19. Spoerk M., Holzer C., Gonzalez-Gutierrez J. Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: a review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, Iss. 137 (12), 48545, pp. 1–16, doi:10.1002/app.48545.
20. Liang J. Z. Effects of extrusion conditions on die-swell behavior of polypropylene/diatomite composite melts. *Polymer Testing*, 2008, Vol. 27 (8), pp. 936–940, doi:10.1016/j.polymertesting.2008.08.001.
21. Cyriac F., Covas J., Hilliou L. Predicting extrusion instabilities of commercial polyethylene from non-linear rheology measurements. *Rheologica Acta*, 2014, Vol. 53 Iss. 10–11, pp. 817–829, doi:10.1007/s00397-014-0798-7.
22. Liang J.-Z. The elastic behaviour during capillary extrusion of LDPE/LLDPE blend melts. *Polymer Testing*, 2002, Iss.21 (1), pp. 69–74, doi:10.1016/s0142-9418(01)00050-2.
23. Liang J.-Z., Yang J., Tang C.-Y. Die-swell behavior of PP/Al(OH)₃/Mg(OH)₂ flame retardant composite melts. *Polymer Testing*, 2010, Iss. 29 (5), pp. 624–628, doi:10.1016/j.polymertesting.2010.03.014.
24. Kazatchkov I. B., Hatzikiriakos S. G., Bohnet N. Influence of molecular structure on the rheological and processing behavior of polyethylene resins. *Polymer Engineering & Science*, 1999, Iss. 39 (4), pp. 804–815, doi:10.1002/pen.11468.
25. Liang J.-Z. Melt die-swell behavior of polyoxymethylene blended with ethylene-vinyl acetate copolymer and high-density polyethylene. *Polymer Testing*, 2018, Iss. 68, pp. 213–218, doi:10.1016/j.polymertesting.2018.04.011.
26. Ansari M., Inn Y. W., Sukhadia A. M. Wall slip of HDPEs: molecular weight and molecular weight distribution effects. *Journal of Rheology*, 2013, Iss. 57 (3), pp. 927–948, doi:10.1122/1.4801758.
27. Liang J.-Z., He L. Melt flow properties and melt density of POM/EVA/HDPE nanocomposites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2011, Iss. 50 (13), pp. 1338–1343, doi:10.1080/03602559.2011.584235.
28. Liang J.-Z., Tang C.-Y., Zhou L. Melt density and flow property of PDLLA/nano-CaCO₃ bio-composites. *Composites Part B Engineering*, 2011, Iss. 42 (7), pp. 1897–1900, doi:10.1016/j.compositesb.2011.06.011.

References (transliterated)

1. Mehrjerdi A. K., Adl-Zarrabi B., Cho S.-W. Mechanical and thermophysical properties of high-density polyethylene modified with talc. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, Iss. 129 (4), pp. 2128–2138, doi:10.1002/app.38945.
2. Yu F., Liu T., Zhao X. Effects of talc on the mechanical and thermal properties of polylactide. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, Iss. 125 (S2), pp. 99–109, doi:10.1002/app.36260.
3. Scholten P. B. V., Ozen M. B., Soyler Z. Rheological and mechanical properties of cellulose/LDPE composites using sustainable and fully renewable compatibilisers. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, Iss. 125 (S2), pp. 99–109, doi:10.1002/app.36260.
4. Mehrjerdi A. K., Adl-Zarrabi B., Cho S.-W. Mechanical and thermophysical properties of high-density polyethylene modified with talc. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, Iss. 129 (4), pp. 2128–2138, doi:10.1002/app.38945.
5. Yu F., Liu T., Zhao X. Effects of talc on the mechanical and thermal properties of polylactide. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, Iss. 125 (S2), pp. 99–109, doi:10.1002/app.36260.
6. Scholten P. B. V., Ozen M. B., Soyler Z. Rheological and mechanical properties of cellulose/LDPE composites using sustainable and fully renewable compatibilisers. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, Iss. 125 (S2), pp. 99–109, doi:10.1002/app.36260.
7. Liang J.-Z., He L. Melt flow properties and melt density of POM/EVA/HDPE nanocomposites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2011, Iss. 50 (13), pp. 1338–1343, doi:10.1080/03602559.2011.584235.
8. Liang J.-Z., Tang C.-Y., Zhou L. Melt density and flow property of PDLLA/nano-CaCO₃ bio-composites. *Composites Part B Engineering*, 2011, Iss. 42 (7), pp. 1897–1900, doi:10.1016/j.compositesb.2011.06.011.
9. Ansari M., Inn Y. W., Sukhadia A. M. Wall slip of HDPEs: molecular weight and molecular weight distribution effects. *Journal of Rheology*, 2013, Iss. 57 (3), pp. 927–948, doi:10.1122/1.4801758.
10. Liang J.-Z., He L. Melt flow properties and melt density of POM/EVA/HDPE nanocomposites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2011, Iss. 50 (13), pp. 1338–1343, doi:10.1080/03602559.2011.584235.
11. Liang J.-Z., Tang C.-Y., Zhou L. Melt density and flow property of PDLLA/nano-CaCO₃ bio-composites. *Composites Part B Engineering*, 2011, Iss. 42 (7), pp. 1897–1900, doi:10.1016/j.compositesb.2011.06.011.

Відомості про авторів (About the Authors)

Чулєєва Олена Володимирівна – доктор технічних наук, директор науково-технічного центру, приватне акціонерне товариство «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7310-0788>; e-mail: echuleeva@ukr.net.

Chulieieva Olena – Doctor of Technical Sciences, Director of the Science and Technology Center, PJSC “Yuzhcable Works”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7310-0788>; e-mail: echuleeva@ukr.net.

Золотарьов Володимир Михайлович – доктор технічних наук, Генеральний директор, приватне акціонерне товариство «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3886-4993>; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua.

Zolotaryov Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director General, PJSC “Yuzhcable Works”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3886-4993>; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua.

Чулєєв Володимир Леонідович – кандидат технічних наук, завідувач групи з теплофізичних методів аналізу науково-технічного центру, приватне акціонерне товариство «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна.

Chulieiev Volodymyr – PhD, Head of the Group on Thermophysical Methods Analysis Science and Technology Center, PJSC “Yuzhcable Works”, Kharkiv, Ukraine.

Кулєшова Тетяна Анатольєвна – провідний інженер науково-технічного центру, приватне акціонерне товариство «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна.

Kuleshova Tetiana – Lead Engineer of the Science and Technology Center, PJSC “Yuzhcable Works”, Kharkiv, Ukraine.

Суслін Микола Сергійович – інженер науково-технічного центру, приватне акціонерне товариство «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна.

Suslin Mykola – Engineer of the Science and Technology Center, PJSC “Yuzhcable Works”, Kharkiv, Ukraine.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Чулєєва О. В., Золотарьов В. М., Чулєєв В. Л., Кулєшова Т. А., Суслін М. С. В'язкопружні властивості полімерної композиції, що не містить галогенів, для кабельної продукції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 67-74. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.09.

Please cite this article as:

Chulieieva O., Zolotaryov V., Chulieiev V., Kuleshova T., Suslin M. The viscoelastic properties of a halogen-free polymer composition, for cable products. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4(10), pp. 67-74, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.09.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Чулєєва О. В., Золотаєв В. М., Чулєєв В. Л., Кулєшова Т. А., Суслін Н. С. Вязкоупругие свойства полимерной композиции, которая не содержит галогенов, для кабельной продукции. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 67-74. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.09.

АННОТАЦІЯ *Исследованы вязкоупругие свойства полимерной композиции, не содержащей галогенов, для кабельной продукции. Определено влияние температурных параметров, скорости сдвига на коэффициент разбухания полимерной композиции, исследована зависимость плотности расплава от температуры. Полимерная матрица представляет собой смесь полиолефинов (линейный полиэтилен низкой плотности; полиолефиновый эластомер и модифицированный малеиновым ангидридом линейный полиэтилен низкой плотности), как наполнитель антипирен для полимерной композиции – тригидрат оксида алюминия. Содержание наполнителя-антипирена в полимерной композиции составляет 60 %. Полимерную композицию производили на линии компаундирования компании X-Cotround, Швейцария. Исследование плотности расплава и коэффициента разбухания полимерной композиции проводили на капиллярном вискозиметре типа ИИРТ-АМ. Для определения плотности расплава использовали соотношение длины капилляра к диаметру (L/D) 4. Результаты исследования зависимости плотности расплава полимерной матрицы от температуры 150–190°C при разной нагрузке показали, что этот параметр снижается от 789 до 744 кг/м³, а для полимерной композиции от 1309 до 1268 кг/м³. Коэффициент разбухания при повышении скорости сдвига при температуре 150–190°C для полимерной матрицы увеличивается от 1,102 до 1,520, а для полимерной композиции уменьшается от 1,056 до 1,018. Исследования зависимости коэффициента разбухания полимерной матрицы и полимерной композиции от соотношения длины формующего инструмента к диаметру показывают, что коэффициент разбухания для полимерной матрицы снижается от 1,296 до 1,152, а для полимерной композиции от 1,045 до 1,01. Установлено, что на вязкоупругие свойства полимерной композиции, не содержащей галогенов, существенно влияют: температурные параметры переработки, скорость сдвига, плотность расплава, соотношение длины формующего инструмента к диаметру. Результаты исследований позволяют обоснованно подходить к определению технологических параметров изготовления изоляции, оболочек силовых кабелей и оптических кабелей микромодульной конструкции. Это также позволит быстро вносить корректировку в геометрические параметры формующего инструмента кабельных головок.*

Ключевые слова: *коэффициент разбухания; скорость сдвига; температура; плотность расплава; капиллярный вискозиметр*

Надійшла(received) 29.12.2021

УДК 510.6:004.89

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.10

ВЛАСТИВОСТІ ІНТЕРВАЛЬНИХ НЕЧІТКИХ МНОЖИН ТИПУ-2 В СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

О. Ю. ЗАКОВОРОТНИЙ, А. О. ХАРЧЕНКО*

кафедра обчислювальної техніки та програмування, НТУ «ХПІ», м. Харків, УКРАЇНА
*e-mail: artem.kharchenko.ua@gmail.com

АНОТАЦІЯ Розглянуто визначення та методи побудови інтервальних нечітких множин типу-2 в системах нечіткого логічного виведення для задач керування складними технічними об'єктами в умовах невизначеності. Описано основні типи невизначеностей, які виникають при проектуванні систем нечіткого логічного виведення та залежать від кількості експертних оцінок. Запропоновано методи оцінки інтраневизначеності та інтерневизначеності з урахуванням різної кількості експертних оцінок на етапі визначення типів та кількості функцій належності. Визначено фактори, які впливають на параметри та властивості інтервальних нечітких множин типу-2 під час експериментальних досліджень. До таких факторів належать: кількість проведених експериментів, фактори зовнішнього середовища, технічні параметри об'єкта керування та працездатність компонентів комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень. Досліджено властивості нижніх та верхніх функцій належності інтервальних нечітких множин типу-2 на прикладі гаусової функції належності, яка є однією з найбільш використовуваних в задачах проектування систем нечіткого логічного виведення. Враховано основні особливості та відмінності у методах визначення нижніх та верхніх функцій належності інтервальних нечітких множин типу-2 для різних типів невизначеностей. Розглянуто методи опису площі невизначеності, а також залежність її розмірів від кількості експертних оцінок. Площа невизначеності характеризується нижньою та верхньою функціями належності, а її розміри впливають безпосередньо на точність отриманих розв'язків. Розроблено методи визначення інтервальних нечітких множин типу-2 за допомогою коефіцієнтів регулювання параметрів функцій належності для інтраневизначеності та коефіцієнтів ваги функцій належності для інтерневизначеностей. Коефіцієнт регулювання параметрів функції може бути використаний для опису нижньої та верхньої функцій належності, визначаючи при цьому розміри площі невизначеності. Визначено складені інтервальні множини типу-2 для врахування інтерневизначеностей в задачах проектування систем нечіткого логічного виведення.

Ключові слова: інтервальна нечітка множина типу-2; функція належності; коефіцієнт регулювання; система підтримки прийняття рішень; складена множина; оптимальне керування

PROPERTIES OF INTERVAL TYPE-2 FUZZY SETS IN DECISION SUPPORT SYSTEMS

A. ZAKOVOROTNIY, A. KHARCHENKO

Department of Computer Engineering and Programming, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Definitions and methods of designing interval type-2 fuzzy sets in fuzzy inference systems for control problems of complex technical objects in conditions of uncertainty are considered. The main types of uncertainties, that arise when designing fuzzy inference systems and depend on the number of expert assessments, are described. Methods for assessing intra-uncertainty and inter-uncertainty are proposed, taking into account the different number of expert assessments at the stage of determining the types and number of membership functions. Factors influencing the parameters and properties of interval type-2 fuzzy during experimental studies are determined. Such factors include the number of experiments performed, external factors, technical parameters of the control object, and the reliability of the components of the computer system decision support system. The properties of the lower and upper membership functions of interval type-2 fuzzy sets are investigated on the example of the Gaussian membership function, which is one of the most used in the problems of fuzzy inference systems design. The main features and differences in the methods of determining the lower and upper membership functions of interval type-2 fuzzy sets for different types of uncertainties are taken into account. Methods for determining the footprint of uncertainty, as well as the dependence of its size on the number of expert assessments, are considered. The footprint of uncertainty is characterized by the lower and upper membership functions, and its size directly affects the accuracy of the obtained solutions. Methods for determining interval type-2 fuzzy sets using regulation factors of membership function parameters for intra-uncertainty and weighting factors of membership functions for inter-uncertainties have been developed. The regulation factor of the function parameters can be used to describe the lower and upper membership functions while determining the size of the footprint of uncertainty. Complex interval type-2 sets are determined to take into account inter-uncertainties in the problems of fuzzy inference systems design.

Keywords: interval type-2 fuzzy set; membership function; regulation factor; decision support system; complex set; optimal control

Вступ

Методи нечіткої логіки набувають широкого використання в задачах проектування систем підтримки прийняття рішень, розпізнавання та класифікації об'єктів, прогнозування часових рядів,

оптимального керування складними технічними об'єктами та інших задачах, які пов'язані з використанням експертних оцінок. Одними з основних особливостей та переваг використання нечіткої логіки – є можливість враховувати невизначеності щодо оцінки лінгвістичної змінної та

неповноту даних під час їх обробки. Значна кількість робіт присвячена темі визначення лінгвістичних змінних, термів та функцій належності різних типів, а також – дослідженню зв'язків між їх кількістю та точністю роботи розроблених моделей [1-3]. При розв'язанні певної задачі, автори намагаються врахувати якомога більше факторів, які можуть вплинути на точність роботи моделі, однак це впливає на збільшення кількості лінгвістичних змінних, термів, правил у базі знань та збільшення часу на обробку інформації. Використання ієрархічних систем нечіткого логічного виведення дозволяє частково розв'язати ці задачі, однак невизначеність, яка стосується різних оцінок одного параметру залишається [4].

У 1975 році Zadeh було наведено визначення нечітких множин типу- n , зокрема було розглянуто приклади визначення нечітких множин та операцій між ними [5]. Однак обчислювальна техніка у той час не дозволяла повною мірою використовувати математичний апарат нечітких множин типу-2 (ІНМТ2). У 2000 році Liang та Mendel опублікували статтю, у якій дали визначення інтервальним нечітким множинам типу-2 (ІНМТ2) та розглянули практичні аспекти їх застосування в системах нечіткого логічного виведення [6]. У подальшому Mendel вказував на використання саме ІНМТ2 для моделювання слів, оскільки нечіткі множини типу-1 не можуть бути використані для оцінки лінгвістичних невизначеностей, так як їхня функція належності є одним числом [7]. З тих пір ІНМТ2 знаходять своє практичне застосування у різних задачах. Зокрема, у роботах [8,9] ІНМТ2 використовуються для багатокритеріальних задач прийняття рішень. Значна кількість робіт присвячена розпізнаванню та ідентифікації об'єктів: виявлення контурів на зображеннях [10], виявлення легеневих вузликів [11], сегментація зображень [12].

Окремої уваги заслуговують також системи нечіткого регулювання з використанням ІНМТ2 [13,14]. Основними задачами, які ставляться при розробці систем, є визначення лінгвістичних змінних, якими можуть бути як технічні параметри об'єкта керування, так і фактори зовнішнього середовища, а також оцінка невизначеності вхідних даних. Незважаючи на стрімкий розвиток обчислювальної техніки, залишаються задачі, які пов'язані з визначенням оптимальної кількості термів та функцій належності типу-2, а також – зменшення області невизначеності в ІНМТ2 та перетворення множин різних типів з мінімальними часовими витратами.

Мета роботи

Метою даної роботи є дослідження властивостей інтервальних нечітких множин типу-2 з урахуванням невизначеностей в комп'ютерних системах підтримки прийняття рішень для визначення

оптимальних параметрів керування складними технічними об'єктами. Визначення нижньої та верхньої функцій належності різного типу для оцінки площі невизначеності в інтервальних нечітких множинах типу-2. Розробка складених інтервальних нечітких множин типу-2 з урахуванням різних типів невизначеностей.

Невизначеності в нечітких системах логічного виведення типу-2

У роботі [15] автором розглядаються поняття невизначеностей різного типу при побудові функцій належності в нечітких системах: інтраневизначеність та інтерневизначеність. Інтраневизначеність виникає у одного суб'єкта (експерт) внаслідок недостатньої кількості знань щодо об'єкта досліджень або нечіткої оцінки щодо певного слова (терм лінгвістичної змінної). Інтерневизначеність виникає внаслідок різних оцінок термів лінгвістичної змінної від різних експертів. Інтраневизначеність може бути описана як ІНМТ2, а інтерневизначеність – шляхом об'єднання різних ІНМТ2. Варто зазначити, що при розробці систем нечіткого регулювання необхідно врахувати те, що невизначеності можуть виникати не лише під час опису лінгвістичних змінних, а й під час роботи комп'ютерної системи та об'єкта керування. Основні причини виникнення невизначеностей різного типу наведено на рис. 1.



Рис. 1 – Невизначеності при розробці систем нечіткого логічного виведення типу-2

Перед розробкою систем нечіткого виводу типу-2 рекомендується виконувати перевірку вхідних даних на наявність статистичних невизначеностей, зокрема і для врахування виключних ситуацій, які пов'язані з працездатністю компонентів комп'ютерної системи. За допомогою набору даних, що не містить статистичних невизначеностей, або якщо природа їх виникнення відома – можна будувати нечіткі множини типу-2. Як ми бачимо на рис. 1,

невизначеності з'являються при оцінці експертами термів лінгвістичної змінної. Якщо модель визначена однією оцінкою ($n=1$), то ми маємо ситуацію інтраневизначеності та використовуємо ІНМТ2. У даній роботі оцінка однієї групи експертів ($k=1$) визначається також як інтраневизначеність, оскільки їхнє рішення має бути узгодженим. Також вона може бути визначена як інтервизначеність шляхом об'єднання кожної окремої оцінки. Зазвичай, виконується наступна умова при $k=n=1$:

$$FOU(k) \geq FOU(n), \quad (1)$$

де $FOU(k)$ – площа невизначеності (footprint of uncertainty) для оцінки групи експертів, $FOU(n)$ – площа невизначеності для оцінки одного експерта.

Незважаючи на різні причини виникнення невизначеностей, оцінки експертів щодо опису конкретного терму можуть змінитися після проведення ряду досліджень, зокрема: збільшення кількості експериментів, зміна технічних параметрів об'єкта керування, зміна або уточнення факторів зовнішнього середовища, а також – перевірка надійності роботи компонентів комп'ютерної системи. Внаслідок виникнення нових наборів даних після проведення експериментальних досліджень доцільно переглянути параметри функції належності типу-2, їх типів та кількість термів для кожної лінгвістичної змінної. Також додатковими шляхами удосконалення системи нечіткого виводу може бути моделювання нових лінгвістичних змінних, що часто використовується при визначенні нових факторів зовнішнього середовища. Не рекомендується проектування нечітких систем типу-2, вхідними даними у котрих є пов'язані параметри різних компонентів однієї комп'ютерної системи, особливо якщо зв'язок між ними не є дослідженим та залежить від зовнішніх факторів. Такі дії можуть призвести до збільшення похибки при перетворенні типів функцій належності на виході нечіткої системи.

Інтервальні нечіткі множини типу-2

Визначення нечітких множин типу-2 та основні операції над ними наведено авторами у роботах [16,17]. Також зазначається, що для проєктування нечітких систем типу-2 можливе використання математичного апарату нечітких множин типу-1.

Нечітка множина типу-2 (\tilde{A}) на універсальній множині X визначена функцією належності типу-2 – $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$, де $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$ [16]:

$$\tilde{A} = \{(x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1]\}, \quad (2)$$

де J_x – первинна належність x . Іншим варіантом визначення НМТ2 є об'єднання значень належностей для всіх допустимих x та u :

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, u)/(x, u), \quad J_x \subseteq [0,1]. \quad (3)$$

Враховуючи обчислювальну складність при роботі з нечіткими множинами, при побудові систем нечіткого регулювання використовуються інтервальні нечіткі множини типу-2. ІНМТ2 є нечіткою множиною, де виконується наступна умова – для всіх $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = 1$. Таким чином ІНМТ2 є підмножиною нечітких множин типу-2 та описується наступним чином [16]:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} 1/(x, u), \quad J_x \subseteq [0,1]. \quad (4)$$

Для визначення ІНМТ2 достатньо описати площу невизначеності (FOU) за допомогою двох функцій належності типу-1: нижньої (lower membership function, $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$) та верхньої (upper membership function, $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$), між якими виконується нерівність:

$$\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) \leq \overline{\mu}_{\tilde{A}}(x), \quad \forall x \in X. \quad (5)$$

Визначення розміру FOU є однією з основних задач при проектуванні систем нечіткого логічного виведення, оскільки збільшення її розмірів впливає на точність роботи створеної моделі та збільшення часу на виконання обчислень в комп'ютерній системі.

Іншою задачею є вибір типу функцій належності. На сьогоднішній день, одними з найбільш використовуваних функцій належності типу-2 при розробці систем нечіткого логічного виведення є: гаусова (gaussmf), трикутна (trimf), трапецієподібна (trapmf) та дзвоноподібна (gbellmf). Приклади даних функцій належності типу-2 наведено на рис. 2. У роботі [18] авторами використовуються нестандартні функції належності типу-2 для моделювання невизначеності.

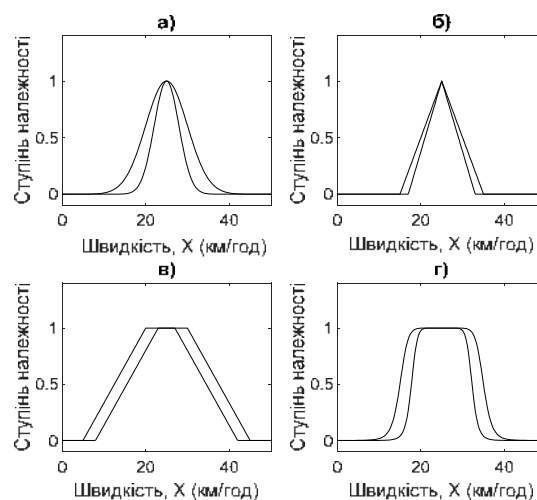


Рис. 2 – Функції належності типу-2: а) – гаусова (gaussmf); б) – трикутна (trimf); в) – трапецієподібна (trapmf); г) – дзвоноподібна (gbellmf)

При розробці систем нечіткого регулювання доцільно використовувати функції належності, які мають мінімальну кількість параметрів, тому використаємо гаусову функцію належності типу-1 для побудови функцій належності типу-2:

$$\mu_A(x_{m,\sigma}) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right], \quad (6)$$

де $\mu_A(x_{m,\sigma})$ – гаусова функція належності типу-1, m – центр нечіткої множини, σ – параметр відхилення (крутизна функції).

Розглянемо методи визначення ІНМТ2 для моделі інтраневизначеності – один експерт ($n=1$). Як зазначалося раніше, для побудови ІНМТ2 достатньо визначити 2 функції належності типу-1. Для гаусової функції належності існує три варіанти визначення ІНМТ2 за допомогою функцій належності типу-1 [17]:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = f(m_1, m_2, \sigma); \quad (7)$$

$$\mu_{\bar{A}}(x) = f(m, \sigma_1, \sigma_2); \quad (8)$$

$$\mu_{\bar{A}}(x) = f(m_1, m_2, \sigma_1, \sigma_2). \quad (9)$$

Однак варіант з використанням 4-х параметрів (9) рідко використовується на практиці. Для подальшого визначення нижньої та верхньої функції належності задається наступна умова: $\sigma_1 < \sigma_2$. З урахуванням нерівності (5) значення нижньої функції належності $\underline{\mu}_{\bar{A}}(x)$ для (8) описується наступним чином [17]:

$$\underline{\mu}_{\bar{A}}(x) = f(x, m, \sigma_1) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma_1}\right)^2\right]. \quad (10)$$

Для верхньої функції належності $\bar{\mu}_{\bar{A}}(x)$ отримуємо:

$$\bar{\mu}_{\bar{A}}(x) = f(x, m, \sigma_2) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma_2}\right)^2\right]. \quad (11)$$

Нижня та верхня функції належності також можуть бути визначені за допомогою коефіцієнта відхилення для значень $\sigma - k_\sigma$. Для коефіцієнта має виконуватися наступна умова: $0 \leq k_\sigma < 1$. Якщо $k_\sigma = 0$, то $\underline{\mu}_{\bar{A}}(x) = \bar{\mu}_{\bar{A}}(x)$. У цьому випадку ми отримуємо функцію належності типу-1. Коефіцієнт k_σ може бути використаний в системі нечіткого регулювання у 3 різних формах: для визначення нижньої функції належності $\underline{\mu}_{\bar{A}}(x)$; для визначення верхньої функції належності $\bar{\mu}_{\bar{A}}(x)$; для визначення нижньої та верхньої функцій належності ($\underline{\mu}_{\bar{A}}(x), \bar{\mu}_{\bar{A}}(x)$). При цьому його значення впливає безпосередньо на розмір площі невизначеності. На

рис. 3 зображені площі невизначеності при різних значеннях коефіцієнта k_σ , котрі визначають нижню функцію належності $\underline{\mu}_{\bar{A}}(x)$. Виходячи з рис. 3, збільшення значення k_σ призводить до збільшення розміру FOU. Якщо враховувати нерівність (1) для оцінки розміру FOU, отримаємо наступну нерівність для значень коефіцієнта k_σ для одного експерта ($n=1$) та 1 групи експертів ($k=1$):

$$k_\sigma(k) \geq k_\sigma(n). \quad (12)$$

З використанням коефіцієнту k_σ для визначення двох функцій належності отримуємо наступний вираз для нижньої функції належності $\underline{\mu}_{\bar{A}}(x)$:

$$\underline{\mu}_{\bar{A}}(x) = f(x, m, \sigma, k) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma - k_\sigma \cdot \sigma}\right)^2\right]. \quad (13)$$

Верхня функції належності $\bar{\mu}_{\bar{A}}(x)$ описується наступним чином:

$$\bar{\mu}_{\bar{A}}(x) = f(x, m, \sigma, k) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma + k_\sigma \cdot \sigma}\right)^2\right]. \quad (14)$$

Зміна коефіцієнту k_σ при проектуванні системи нечіткого регулювання можлива після проведення експериментальних досліджень. Зокрема, після багаторазового повторення експерименту, значення k_σ може бути зменшене, а при врахуванні додаткових факторів зовнішнього середовища або несправностей в роботі комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень, може бути збільшене. Декілька коефіцієнтів k_σ з окремою вагою використовують для визначення ІНМТ2 з урахуванням оцінок між експертами в межах 1 групи.

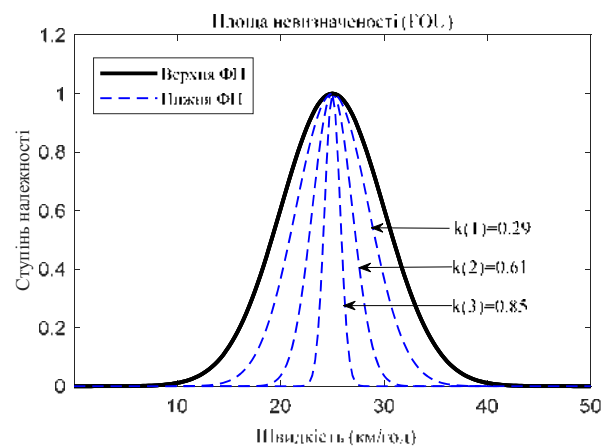


Рис. 3 – Площі невизначеності для різних значень коефіцієнту відхилення k_σ ($\sigma = 5$, $m = 25$)

Інтерневизначеність в системах нечіткого логічного виведення

Методи, які використовуються для визначення інтраневизначеностей при проектуванні ІНМТ2 в системах нечіткого регулювання, можна використати і для врахування інтерневизначеностей (кількість експертів $n > 1$, кількість груп експертів $k > 1$). Однак існують певні особливості щодо визначення параметрів ІНМТ2, зокрема функції (7-9) визначаються кількістю параметрів, що відповідає кількості експертів та груп. Таким чином отримаємо функції ($n > 1$), що містять декілька параметрів для центру нечіткої множини та відхилення:

$$\mu_{\tilde{A}(n)}(x) = f(m_1, m_2, \dots, m_n; \sigma); \quad (15)$$

$$\mu_{\tilde{A}(n)}(x) = f(m; \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n); \quad (16)$$

$$\mu_{\tilde{A}(n)}(x) = f(m_1, m_2, \dots, m_n; \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n). \quad (17)$$

Для декількох груп експертів ($k > 1$) отримаємо наступні функції:

$$\mu_{\tilde{A}(k)}(x) = f(m_1, m_2, \dots, m_k; \sigma); \quad (18)$$

$$\mu_{\tilde{A}(k)}(x) = f(m; \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k); \quad (19)$$

$$\mu_{\tilde{A}(k)}(x) = f(m_1, m_2, \dots, m_k; \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k). \quad (20)$$

Для опису нижньої $\underline{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x)$ та верхньої $\overline{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x)$ функцій належності, при фіксованому значенні m (19), необхідно визначити σ_{\min} та σ_{\max} . Тоді нижня функція належності матиме наступний вигляд:

$$\underline{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x) = f(x, m, \sigma_{\min}) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma_{\min}}\right)^2\right]. \quad (21)$$

Верхня функція належності для ситуації інтерневизначеності описується з використанням максимального значення відхилення у гаусовій функції належності:

$$\overline{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x) = f(x, m, \sigma_{\max}) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma_{\max}}\right)^2\right]. \quad (22)$$

У цьому випадку множина $\tilde{A}(n, k)$ є складеною, тобто такою, що визначена декількома функціями належності типу-2 [17]. Однак площа невизначеності в цьому випадку описується за допомогою двох функцій належності типу-1, які можуть бути підмножинами різних нечітких множин типу-2. У цьому випадку FOU визначається незалежно від того, яка кількість експертних оцінок використовується в задачі системи нечіткого логічного виведення.

FOU для $\tilde{A}(n, k)$ може бути описана наступним чином:

$$FOU(\tilde{A}(n, k)) = \bigcup_{x \in X} \left[\underline{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x), \overline{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x) \right]. \quad (23)$$

Однак ІНМТ2 може бути визначена за допомогою різних типів функцій належності, що ускладнює визначення нижньої та верхньої функцій належності, а також опис площі невизначеності. Якщо не існує таких функцій належності, де виконується умова:

$$\underline{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x) \leq \mu_{\tilde{A}(n,k)}(x') \leq \overline{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x), \forall x \in X, \quad (24)$$

де $\mu_{\tilde{A}(n,k)}(x')$ – будь-яка функція належності, яка є підмножиною FOU , то доцільно описувати площу невизначеності як об'єднання декількох FOU , що мають меншу площу та задовольняють умову (24).

Висновки

Невизначеності різного типу, які виникають під час оцінок експертами окремих параметрів об'єкта керування, впливають на типи та кількість функцій належності, а також – на розміри FOU . Розглянуті властивості функцій належності та розроблені методи визначення FOU для різних типів невизначеностей не є вичерпними, оскільки існує висока ймовірність зменшення або збільшення розмірів FOU після проведення експериментальних досліджень.

При розробці комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень доцільно використовувати коефіцієнти відхилення (регулювання) параметрів. Для інтраневизначеності коефіцієнт застосовується до параметрів функцій належності. У цьому випадку – необхідно досліджувати розміри FOU , оскільки збільшення площі невизначеності зменшує точність роботи системи нечіткого регулювання. В ситуаціях інтерневизначеності FOU визначається декількома функціями належності типу-2, тому доцільне використання коефіцієнту ваги для кожної з них. Значення коефіцієнту ваги залежить від знань та досвіду експертів (різних груп експертів). Також необхідно досліджувати побудову ІНМТ2 за допомогою різних функцій належності, оскільки це ускладнює визначення FOU .

Список літератури

1. Reddy P. V. S. Fuzzy logic based on Belief and Disbelief membership functions. *Fuzzy Information and Engineering*. 2017. 9(4). P. 405-422. doi: 10.1016/j.fiae.2017.12.001.
2. Babanezhad M., Masoumian A., Nakhjiri A. T., Marjani A., Shirazian S. Influence of number of membership functions on prediction of membrane systems using adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS). *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10(1). P. 1-20. doi:10.1038/s41598-020-73175-0.

3. Pelalak R., Nakhjiri A. T., Marjani A., Rezakazemi M., Shirazian S. Influence of machine learning membership functions and degree of membership function on each input parameter for simulation of reactors. *Scientific Reports*. 2021. 11(1). P.1-11. doi:10.1038/s41598-021-81514-y.
4. Razak T. R., Garibaldi J. M., Wagner C., Pourabdollah A., Soria D. Toward a Framework for Capturing Interpretability of Hierarchical Fuzzy Systems—A Participatory Design Approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2020. 29(5). P.1160-1172. doi: 10.1109/TFUZZ.2020.2969901.
5. Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information sciences*. 1975. Vol. 8(3). P.199-249. doi: 10.1016/0020-0255(75)90036-5.
6. Liang Q., Mendel J. M. Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2000. 8(5). P. 535-550. doi: 10.1109/91.873577.
7. Mendel J. M. Type-2 fuzzy sets: some questions and answers. *IEEE Connections, Newsletter of the IEEE Neural Networks Society*. 2003. 1. P. 10-13.
8. Deveci M., Cali U., Kucuksari S. and Erdogan N. Interval type-2 fuzzy sets based multi-criteria decision-making model for offshore wind farm development in Ireland. *Energy*. 2020. P. 117317. doi: 10.1016/j.energy.2020.117317.
9. Oladipupo O. O., Oyelade O. J., Adubi S. Recruitment process based on computing with words using interval type-2 fuzzy set HM approach. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2019*. 2019.
10. Biswas, R., Sil J. An improved canny edge detection algorithm based on type-2 fuzzy sets. *Procedia Technology*. 2012. 4. P. 820-824. doi: 10.1016/j.protecy.2012.05.134.
11. Hosseini R., Qanadli S. D., Barman S., Mazinani M., Ellis T., Dehmeshki J. An automatic approach for learning and tuning Gaussian interval type-2 fuzzy membership functions applied to lung CAD classification system. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2011. 20(2). P. 224-234. doi: 10.1109/TFUZZ.2011.2172616.
12. Zhao F., Chen Y., Liu H., Fan J. Alternate PSO-based adaptive interval type-2 intuitionistic fuzzy C-means clustering algorithm for color image segmentation. *IEEE Access*. 2019. 7. P. 64028-64039. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2916894.
13. Yatak M. Ö., Şahin F. Ride Comfort-Road Holding Trade-off Improvement of Full Vehicle Active Suspension System by Interval Type-2 Fuzzy Control. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2021. 24(1). P. 259-270. doi: 10.1016/j.jestch.2020.10.006.
14. Al-Mahturi A., Santoso F., Garratt M. A., Anavatti S. G. A robust adaptive interval Type-2 fuzzy control for autonomous underwater vehicles. In *2019 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT)*. 2019. P. 19-24. doi: 10.1109/ICIAICT.2019.8784855.
15. Mendel J. M. Fuzzy sets for words: a new beginning. In *The 12th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ'03*. 2003. 1. P. 37-42. doi: 10.1109/FUZZ.2003.1209334.
16. Mendel J. M., John R. I., Liu F. Interval type-2 fuzzy logic systems made simple. *IEEE transactions on fuzzy systems*. 2006. 14(6). P.808-821. doi:10.1109/TFUZZ.2006.879986.
17. Zakovorotniy A., Kharchenko A. Optimal Speed Controller Design with Interval Type-2 Fuzzy Sets. In *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 363-366. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570045.
18. Kayacan E., Sarabakha A., Coupland S., John R., Khanesar M. A. Type-2 fuzzy elliptic membership functions for modeling uncertainty. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2018. 70. P. 170-183. doi: 10.1016/j.engappai.2018.02.004.

References (transliterated)

1. Reddy P. V. S. Fuzzy logic based on Belief and Disbelief membership functions. *Fuzzy Information and Engineering*, 2017, 9(4), pp. 405-422, doi: 10.1016/j.fiae.2017.12.001.
2. Babanezhad M., Masoumian A., Nakhjiri A. T., Marjani A., Shirazian S. Influence of number of membership functions on prediction of membrane systems using adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS). *Scientific Reports*, 2020, vol. 10(1), pp. 1-20, doi: 10.1038/s41598-020-73175-0.
3. Pelalak R., Nakhjiri A. T., Marjani A., Rezakazemi M., Shirazian S. Influence of machine learning membership functions and degree of membership function on each input parameter for simulation of reactors. *Scientific Reports*, 2021, 11(1), pp. 1-11, doi:10.1038/s41598-021-81514-y.
4. Razak T. R., Garibaldi J. M., Wagner C., Pourabdollah A., Soria D. Toward a Framework for Capturing Interpretability of Hierarchical Fuzzy Systems—A Participatory Design Approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2020, 29(5), pp. 1160-1172, doi: 10.1109/TFUZZ.2020.2969901.
5. Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information sciences*, 1975, vol. 8(3), pp. 199-249. doi: 10.1016/0020-0255(75)90036-5.
6. Liang Q., Mendel J. M. Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2000, 8(5), pp. 535-550, doi: 10.1109/91.873577.
7. Mendel J. M. Type-2 fuzzy sets: some questions and answers. *IEEE Connections, Newsletter of the IEEE Neural Networks Society*, 2003, 1, pp. 10-13.
8. Deveci M., Cali U., Kucuksari S. and Erdogan N. Interval type-2 fuzzy sets based multi-criteria decision-making model for offshore wind farm development in Ireland. *Energy*, 2020, p.117317, doi:10.1016/j.energy.2020.117317.
9. Oladipupo O. O., Oyelade O. J., Adubi S. Recruitment process based on computing with words using interval type-2 fuzzy set HM approach. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2019*, 2019.
10. Biswas R., Sil J. An improved canny edge detection algorithm based on type-2 fuzzy sets. *Procedia Technology*, 2012, 4, pp. 820-824, doi: 10.1016/j.protecy.2012.05.134.
11. Hosseini R., Qanadli S. D., Barman S., Mazinani M., Ellis T., Dehmeshki J. An automatic approach for learning and tuning Gaussian interval type-2 fuzzy membership functions applied to lung CAD classification system. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2011, 20(2), pp. 224-234, doi: 10.1109/TFUZZ.2011.2172616.
12. Zhao F., Chen Y., Liu H., Fan J. Alternate PSO-based adaptive interval type-2 intuitionistic fuzzy C-means clustering algorithm for color image segmentation. *IEEE Access*, 2019, 7, pp. 64028-64039, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2916894.
13. Yatak M. Ö., Şahin F. Ride Comfort-Road Holding Trade-off Improvement of Full Vehicle Active Suspension System by Interval Type-2 Fuzzy Control. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2021, 24(1), pp. 259-270, doi: 10.1016/j.jestch.2020.10.006.

14. Al-Mahturi A., Santoso F., Garratt M. A., Anavatti S. G. A robust adaptive interval Type-2 fuzzy control for autonomous underwater vehicles. In *2019 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT)*, 2019, pp. 19-24, doi: 10.1109/ICIAICT.2019.8784855.
15. Mendel J. M. Fuzzy sets for words: a new beginning. In *The 12th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2003. FUZZ'03*, 2003, 1, pp. 37-42, IEEE, doi: 10.1109/FUZZ.2003.1209334.
16. Mendel J. M., John R. I., Liu F. Interval type-2 fuzzy logic systems made simple. *IEEE transactions on fuzzy systems*, 2006, 14(6), pp.808-821, doi:10.1109/TFUZZ.2006.879986.
17. Zakovorotniy A., Kharchenko A. Optimal Speed Controller Design with Interval Type-2 Fuzzy Sets. In *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2021 pp. 363-366, doi:10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570045.
18. Kayacan E., Sarabakha A., Coupland S., John R., Khanesar M. A. Type-2 fuzzy elliptic membership functions for modeling uncertainty. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2018, 70, pp. 170-183, doi: 10.1016/j.engappai.2018.02.004.

Відомості про авторів (About authors)

Заковоротний Олександр Юрійович – доктор технічних наук, професор кафедри обчислювальної техніки та програмування, вчений секретар Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-4415-838X; e-mail: zakovorotniy@kpi.kharkov.ua.

Alexander Zakovorotniy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4415-838X; e-mail: zakovorotniy@kpi.kharkov.ua.

Харченко Артем Олександрович – аспірант, кафедра обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5636-3148; e-mail: artem.kharchenko.ua@gmail.com.

Artem Kharchenko – Ph.D Student, Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5636-3148; e-mail: artem.kharchenko.ua@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Заковоротний О. Ю., Харченко А. О. Властивості інтервальних нечітких множин типу-2 в системах підтримки прийняття рішень. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 75–81. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.10.

Please cite this article as:

Zakovorotniy A., Kharchenko A. Properties of interval type-2 fuzzy sets in decision support systems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4 (10), pp. 75–81, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.10.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Заковоротный А. Ю., Харченко А. О. Свойства интервальных множеств типа-2 в системах поддержки принятия решений. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 75–81. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.10.

АННОТАЦІЯ Рассмотрены определения и методы построения интервальных нечетких множеств типа-2 в системах нечеткого логического вывода для задач управления сложными техническими объектами в условиях неопределенности. Описаны основные типы неопределенностей, которые возникают при проектировании систем нечеткого логического вывода и зависят от количества экспертных оценок. Предложены методы оценки интранеоопределенности и интернеопределенности с учетом разного количества экспертных оценок на этапе определения типов и количества функций принадлежности. Определены факторы, влияющие на параметры и свойства интервальных нечетких множеств типа-2 во время экспериментальных исследований. К числу таких факторов относятся: количество проведенных экспериментов, факторы внешней среды, технические параметры объекта управления и работоспособность компонентов компьютерной системы поддержки принятия решений. Исследованы свойства нижних и верхних функций принадлежности интервальных нечетких множеств типа-2 на примере гауссовой функции принадлежности, которая является одной из наиболее используемых в задачах проектирования систем нечеткого логического вывода. Учтены основные особенности и отличия в методах определения нижних и верхних функций принадлежности интервальных нечетких множеств типа-2 для разных типов неопределенностей. Рассмотрены методы описания площади неопределенности, а также зависимости ее размеров от количества экспертных оценок. Площадь неопределенности характеризуется нижней и верхней функциями принадлежности, а ее размеры влияют непосредственно на точность полученных решений. Разработаны методы определения интервальных нечетких множеств типа-2 с помощью коэффициентов регулирования параметров функций принадлежности для интранеоопределенности и коэффициентов веса функций принадлежности для интернеопределенностей. Коэффициент регулирования параметров функций может использоваться для описания нижней и верхней функций принадлежности, оценивая при этом размеры площади неопределенности. Определены составные интервальные множества типа-2 для учета интернеопределенностей в задачах проектирования систем нечеткого логического вывода.

Ключевые слова: интервальное нечеткое множество типа-2; функция принадлежности; коэффициент регулирования; система поддержки принятия решений; оптимальное управление

Надійшла (received) 22.11.2021

УДК 664.8.037.1:634.13

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.11

**ВТРАТИ МАСИ ТА ТОВАРНА ОЦІНКА ПЛОДІВ ГРУШІ ВПРОДОВЖ ЗБЕРІГАННЯ
ЗАЛЕЖНО ВІД СПОСОБУ ПАКУВАННЯ****І. Л. ЗАМОРСЬКА*, О. С. РИБЧАК***кафедра технологій харчових продуктів, Уманський національний університет садівництва, м. Умань, УКРАЇНА*** e-mail: zil197608@gmail.com*

АНОТАЦІЯ Плоди груші мають високу біологічну та харчову цінність, однак, відносяться до швидкопсувних продуктів, зберігання яких супроводжується певними труднощами. Зберегти якість свіжих плодів груші можна за рахунок застосування різних способів пакування, серед яких ефективним є використання поліетиленових вкладишів. У статті представлено результати досліджень втрат маси та виходу товарної продукції плодів груші впродовж зберігання залежно від сорту та способу пакування. Плоди груші сортів Конференція, Ноябрьська Молдови та Основ'янська вищого та першого товарного сорту попередньо охолоджували та пакували в дерев'яні ящики №3, місткістю до 25 кг (варіант «контроль») та в ящики із вкладеним всередину пакетом вкладишем з поліетиленової плівки товщиною 45-50 мкм з наступним герметизуванням (варіант «ящик з поліетиленовим вкладишем»). Зберігали плоди груші впродовж чотирьох місяців за температури $0...+3 \pm 1$ °C і відносної вологості повітря $92 \% \pm 2$ %. Втрати маси плодів визначали методом зважування фіксованих проб, вихід товарної продукції – за ДСТУ 8326:2015. Встановлено, що впродовж періоду зберігання плодів груші втрати їхньої маси склали 2,3-5 %, залежно від сорту і способу пакування. В розрізі помологічних сортів за усередненими даними найвищі втрати маси мали груші сорту Основ'янська – 2,6 %. Застосування поліетиленових вкладишів при зберіганні груш сприяло зменшенню втрат на рівні 0,5-2,3 % залежно від сорту і тривалості зберігання. Виявлено, що в умовах вільного доступу повітря частка стандартної продукції складала 78,6–88,3 % з мінімальним значенням у плодів сорту Конференція та максимумом у плодів сорту Ноябрьська Молдови. Доведено, що пакування плодів груші у дерев'яні ящики з поліетиленовими вкладишами зумовило збільшення виходу товарної продукції до рівня 90,2–98,4 %, зменшення частки нестандартної продукції до 1,6–7,0 % та відходів до 2,8 %. Втрати маси плодів груші сорту Ноябрьська Молдови були на 0,3-1,5 нижчими проти аналогічних показників інших сортів. У плодів цього ж сорту зафіксовано вищий вихід товарної продукції – 88,3–98,4 % залежно від способу зберігання.

Ключові слова: зберігання; груші; спосіб пакування; втрати маси; товарна продукція

**WEIGHT LOSS AND COMMODITY EVALUATION OF PEAR FRUITS DURING
STORAGE DEPENDING ON THE PACKAGING METHOD****I. ZAMORSKA, O. RYBCHAK***Department of Food Technologies, Uman National University of Horticulture, Uman, UKRAINE*

ABSTRACT Pear fruits have a high biological and nutritional value; however, they are perishable products, storage of which is accompanied by certain difficulties. You can preserve the quality of fresh pears through the use of various packaging methods, among which the use of polyethylene liners is effective. The article presents the results of studies of weight loss and yield of pears during storage, depending on the variety and method of packaging. Conferencia, Noiabrskaya, and Osnovianska pears of the highest and first commodity varieties were pre-cooled and packed in wooden boxes №3, with a capacity of up to 25 kg ("control" option) and in boxes with a plastic bag liner inserted inside the package 45–50 μm followed by sealing (option "box with a polyethylene liner"). Pear fruits were stored for four months at a temperature of $0... + 3 \pm 1$ °C and relative humidity of $92\% \pm 2\%$. Fruit weight losses were determined by the method of weighing fixed samples, the yield of marketable products - according to DSTU 8326:2015. It was found that during the storage period of pear fruits, their weight loss was 2.3–5%, depending on the variety and method of packaging. In terms of pomological varieties, according to average data, the highest weight loss was pears of the Osnovianska variety – 2.6%. The use of polyethylene liners during the storage of pears helped to reduce losses by 0.5–2.3% depending on the variety and duration of storage. It was found that in the conditions of free air access the share of standard products was 78.6–88.3% with the minimum value in the fruits of Conference and the maximum in the fruits of Noiabrskaya Moldova. It is proved that packing pear fruits in wooden boxes with polyethylene inserts caused an increase in the yield of marketable products to 90.2–98.4%, a decrease in the share of non-standard products to 1.6–7.0%, and waste to 2.8%. The weight loss of pear fruits of the Noiabrskaya Moldova variety was 0.3–1.5 lower compared to similar indicators of other varieties. The fruits of the same variety recorded a higher yield of marketable products – 88.3–98.4% depending on the method of storage.

Keywords: storage; pears; method of packaging; weight loss; marketable products

Вступ

Груша – цінна плодова культура, що зумовлено високими смаковими властивостями плодів та стабільним попитом серед споживачів. На світовому

ринку відмічають поступове збільшення площ її насаджень зі світовим виробництвом впродовж останніх п'яти років на рівні 22 млн т/рік. Основною зоною вирощування груші є Азія, зі щорічним виробництвом плодів на рівні 18,4 млн тонн. У

країнах Європейського союзу виробництво груш складає 2,8 млн т/рік, у Північній та Південній Америці (2 млн т/рік), Африці (780 тис. т/рік), країнах Океанії (115,4 тис. т/рік) [1]. Найбільш рентабельним вважається вирощування плодів груші сорту Конференція (Conferencia) [2].

В Україні ж площі під грушевици насадженими поступово скорочуються і за підсумками 2019 року не перевищували 1 тис. га зі щорічним валовим збором на рівні 50–170 тис. тонн [3]. Однак, незважаючи на невеликі обсяги виробництва плодів, проблема їхнього зберігання залишається актуальною, що зумовлено більшою вимогливістю плодів до режиму зберігання (порівняно з яблуками) та схильності до розвитку фізіологічних розладів.

Постановка проблеми

Для виробництва плодів з високими споживними властивостями необхідно впроваджувати високопродуктивні сорти, інтенсивні технології вирощування, збирання і зберігання врожаю, які б сприяли гальмуванню процесів досягання плодів, підтримували стійкість до патогенної мікрофлори та запобігали розвитку фізіологічних розладів [4].

Важливим фактором збереження якості плодової продукції в охолодженому стані є її пакування, а найбільш поширеним із матеріалів є полімерні плівки [5]. Для пакування харчових продуктів широко використовують поліетилен низької щільності, поліпропілен, лінійний поліетилен низької щільності та поліетилен високої щільності різної товщини [6]. Селективна проникність плівки сприяє гальмуванню інтенсивності дихання, внаслідок чого подовжується термін зберігання продукції та зберігається її початкова якість [7].

Для пакування плодів груші використовують коробки з гофрованого картону з вкладищами з поліетилену низької та високої щільності, дерев'яні ящики з поліетиленовими вкладищами. Доведено, що пакування плодів груші в ящики з гофрованого картону з вкладищами з поліетилену низької щільності зумовлює мінімальні втрати маси плодів впродовж зберігання [8]. Пакування плодів груші в коробки з гофрованого картону з вкладищами з поліетилену високої щільності запобігає зниженню щільності плодів, що зумовлено гальмуванням процесу їхнього досягання впродовж холодильного зберігання [9]. За даними V. Singh [10], пакування плодів груші у пакети з поліетиленової плівки товщиною 0,01 мм найбільш ефективно сприяє збереженню маси та гальмує швидкість транспірації плодів охолодженому стані [11].

Оскільки втрати маси плодів та вихід товарної продукції після зберігання в охолодженому стані залежать від їхнього пакування, то існує необхідність дослідження впливу способу пакування плодів груші на вказані показники.

Мета роботи

Дослідження впливу способу пакування на втрати маси та вихід товарної продукції плодів груші різних сортів.

Матеріали та методи

Об'єктами дослідження є плоди груші сортів Конференція, Ноябрьська Молдови, Основ'янська.

Дослідження проводили на кафедрі технологій харчових продуктів Уманського національного університету садівництва згідно методичних рекомендацій по зберіганню плодів, овочів і винограду [12]. Груші збирали вручну в знімальній стадії стиглості, відбираючи плоди вищого та першого товарного сорту за ДСТУ 8326:2015. Плоди груші попередньо охолоджували та вкладали в дерев'яні ящики №3, місткістю до 25 кг (варіант «контроль»). Іншу частину плодів вкладали в ящики такої ж місткості із вкладеним всередину пакетом вкладишем з поліетиленової плівки марки «Н» – харчова, товщиною 45–50 мкм та герметизували затискачами (варіант «ящик з поліетиленовим вкладишем»).

Плоди зберігали з вересня по грудень за температури $0...+3 \pm 1$ °C і відносної вологості повітря $92 \% \pm 2$ %.

Під час досліджень визначали втрати маси плодів методом зважуванням фіксованих проб; товарну оцінку за ДСТУ 8326:2015. Експериментальною одиницею в досліді був ящик з плодами, місткістю до 25 кг. Повторність досліду 5-тикратна.

Статистичну обробку здійснювали за допомогою програми StatSoft STATISTICA 6.1.478 Russian, Enterprise Single User (2007).

Обговорення результатів

Важливим показником при зберіганні плодів груші є зміна їхньої маси, що відбувається, в основному, через випаровування води внаслідок різниці тиску пари між плодами та навколишнім середовищем. Розмір втрат залежить від сорту, температури зберігання, відносної вологості повітря в сховищі, наявності упакування, характеру пошкоджень [11].

Природні втрати маси груш під час зберігання залежно від сорту, способу пакування та тривалості зберігання представлено на рис. 1–5.

Отримані результати свідчать про прогресуючі втрати маси протягом всього періоду зберігання плодів груші. Так, впродовж першого місяця зберігання природні втрати маси склали 0,7–1,8 %, залежно від помологічного сорту та способу пакування. Впродовж другого та третього місяців втрати збільшувалися на 0,3–0,7 % і на кінець періоду зберігання сягнули рівня 2,3–5 %.

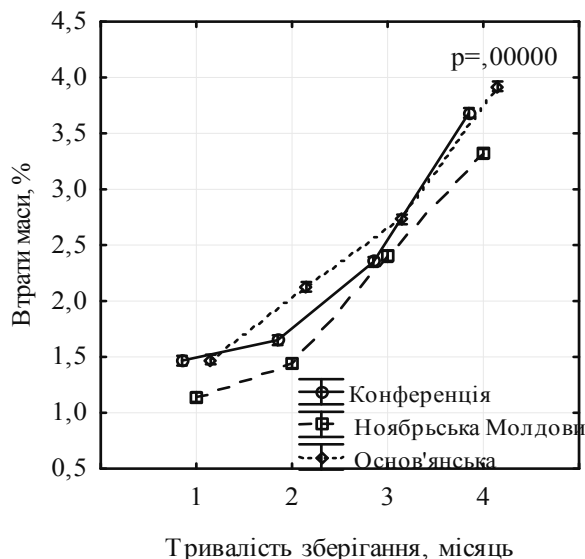


Рис. 1 – Втрати маси плодів груші залежно від тривалості зберігання (результати дисперсійного аналізу), %

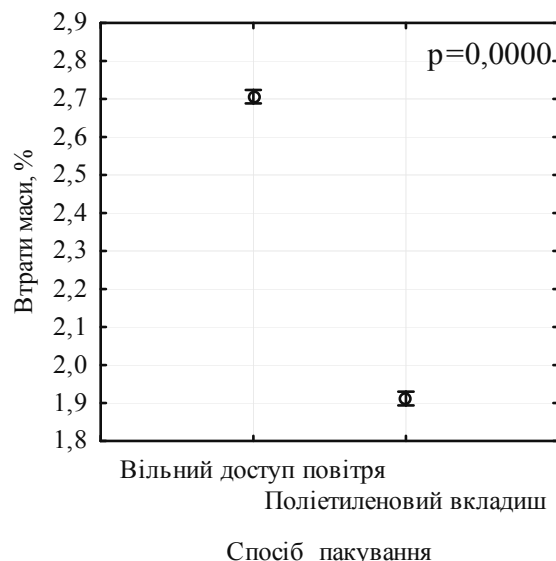


Рис. 3 – Втрати маси плодів груші залежно від способу пакування (результати дисперсійного аналізу), %

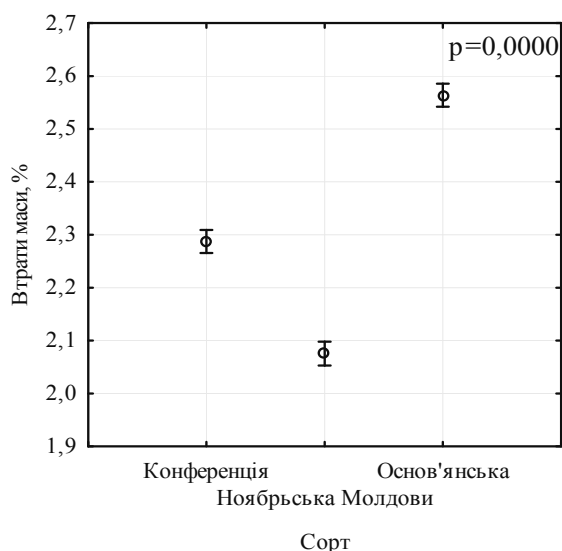


Рис. 2 – Втрати маси плодів груші залежно від сорту (результати дисперсійного аналізу), %

В розрізі помологічних сортів (рис. 2) за усередненими даними найвищі втрати маси мали груші сорту Оснoв'янська – 2,6 %, а дещо менші – на 0,3 % у плодів сорту Конференція що зумовлено більш раннім терміном їхнього досягання, і, як наслідок, активнішим обміном речовин. Найнижчі втрати були у плодів сорту Ноябрьська Молдови.

Залежно від способу пакування (рис. 3) за усередненими статистично значимими даними природні втрати маси плодів груші, що зберігалися із застосуванням поліетиленових вкладишів були в 1,4 рази нижчими, що зумовлено загальним гальмуванням інтенсивності дихання плодів та обміну в них речовин за рахунок селективної проникності поліетиленової плівки та створення модифікованого газового середовища.

Дослідження розміру природних втрат маси плодів груші залежно від тривалості зберігання та способу пакування показали (рис. 4), що за умови вільного доступу повітря до плодів втрати маси зростали активніше.

Так, в кінці першого місяця зберігання за умови вільного доступу повітря втрати маси плодів були на 0,6 % вищими, порівняно з аналогічним показником плодів, що зберігалися з поліетиленовими вкладишами. Впродовж наступних місяців зберігання втрати за умови вільного доступу повітря перевищували на 0,3–0,4%. Впродовж останнього місяця зберігання спостерігалось стрімке зростання природних втрат, та перевищення за умови вільного доступу повітря на 1,4 %.

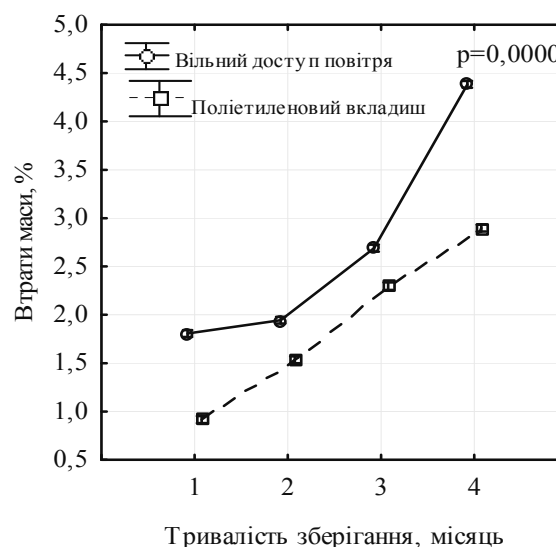


Рис. 4 – Втрати маси плодів груші залежно від тривалості зберігання і способу пакування (результати дисперсійного аналізу), %

Загалом, впродовж періоду зберігання плодів груші втрати їхньої маси склали 2,3–5 % (рис. 5). Застосування поліетиленових вкладишів при зберіганні груш сприяло зменшенню втрат на рівні 0,5–2,3 % залежно від сорту і тривалості зберігання.

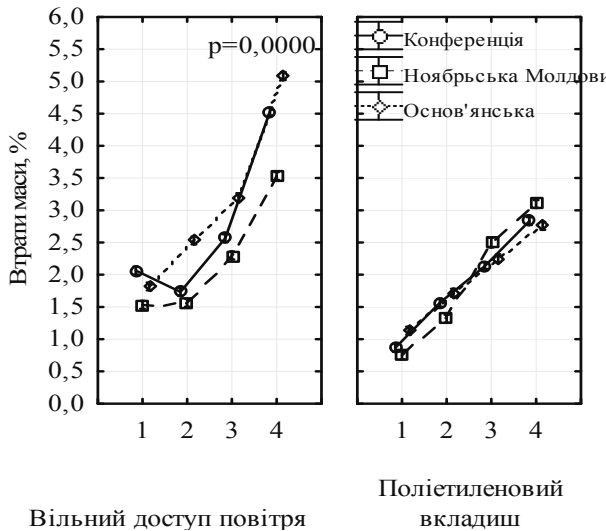


Рис. 5 – Втрати маси плодів груші залежно від тривалості зберігання, сорту і способу пакування (результати дисперсійного аналізу), %

У розрізі помологічних сортів за період зберігання втрати маси плодів груші сорту Ноябрьська Молдови були на 0,3–1,5 нижчими проти аналогічних показників інших сортів.

Оцінка виходу товарної продукції після зберігання показала суттєву різницю як між сортами так і між способами пакування (рис. 6). Так, в умовах вільного доступу повітря частка стандартної продукції складала 78,6–88,3 % з мінімальним значенням у плодів сорту Конференція та максимумом у плодів сорту Ноябрьська Молдови. Частка нестандартної продукції складала 10,2–13,7 %, а відходів – 1,0–7,7 %.

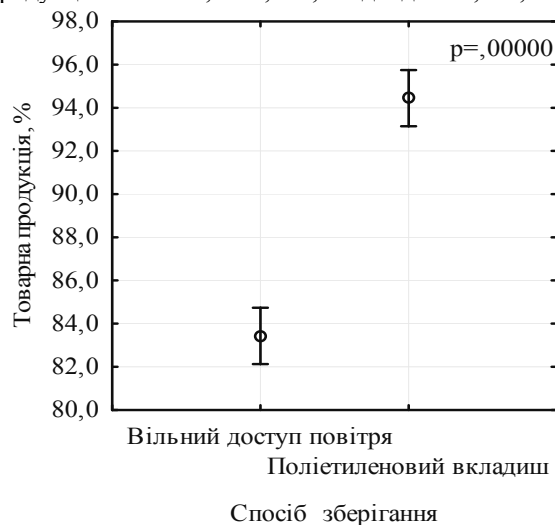


Рис. 6 – Вихід товарної продукції плодів груші залежно від способу пакування (результати дисперсійного аналізу), %

Застосування поліетиленових вкладишів для пакування плодів груші сприяло збільшенню виходу товарної продукції до рівня 90,2–98,4, зменшення частки нестандартної продукції до 1,6–7,0 % та відходів до 2,8 %.

Серед досліджуваних сортів груші в кінці періоду зберігання вищий вихід товарної продукції мали плоди сорту Ноябрьська Молдови – 88,3–98,4 % залежно від способу зберігання (рис. 7) з максимумом при зберіганні із застосуванням поліетиленових вкладишів.

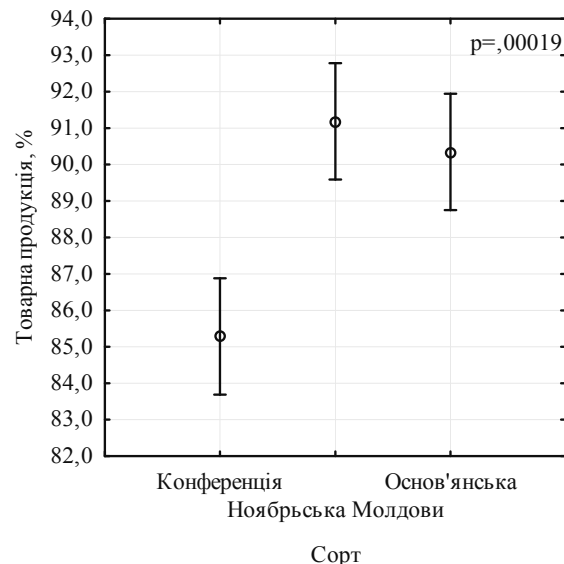


Рис. 7 – Вихід товарної продукції плодів груші залежно від сорту (результати дисперсійного аналізу), %

Висновки

Отже, застосування поліетиленових вкладишів для пакування плодів груші сприяло зниженню у 1,4 рази природних втрат маси, збільшенню виходу товарної продукції на 10,1–11,6 %. Втрати маси плодів груші сорту Ноябрьська Молдови були на 0,3–1,5 нижчими проти аналогічних показників інших сортів за найвищого виходу товарної продукції – 88,3–98,4 % залежно від способу пакування.

Впровадження отриманих результатів наукових досліджень у виробництво сприятиме зменшенню втрат маси плодів груші впродовж зберігання, підвищенню виходу товарної продукції. Важливим є удосконалення способів пакування свіжих плодів груші перед зберіганням, що сприятиме гальмуванню інтенсивності дихання, обміну речовин в плодах; запобігатиме природним втратам маси за підвищення виходу товарної продукції, що є перспективою подальших досліджень авторів.

Список літератури

1. Кишук О.-А. Наші перспективи. URL: <https://agrotimes.ua/article/nashi-perspektyvy/> (дата звернення 10.11.2021).

- Визначено, який сорт груші в Україні вирощувати найрентабельніше. URL: <https://superagronom.com/news/5649-viznachenno-yakiy-sort-grushi-v-ukrayini-viroschuvati-nayrentabelnishe> (дата звернення 10.11.2021).
- Вплив COVID-19 на ринок фруктів і ягід у сезоні-2020/21 дослідження ринку. USAID «Конкурентоспроможна економіка України» (КЕУ). Ініціатива «VTrade Фрукти і Ягоди». 2020. 81 с.
- Особливості зберігання груш. *Новини садівництва*. 2011. №4. URL: <http://novsad.com/?p=872> (дата звернення 10.11.2021).
- Soltani M., Alimardani R., Mobli H., Mohtasebi S. S. Modified atmosphere packaging: a progressive technology for shelf-life extension of fruits and vegetables. *Journal of Applied Packaging Research*. 2015. № 7(3). P 33–59. doi: 10.13140/RG.2.1.2822.0887.
- Nath A., Deka B. C., Singh A., Patel R. K., Paul D., Misra L. K., Ojha H. Extension of shelf life of pear fruits using different packaging materials. *Journal of food science and technology*. 2012. № 49 (5). P. 556–563. doi: 10.1007/s13197-011-0305-4.
- Bouzo C. A., Travadelo M., Gariglio N. F. Effect of different packaging materials on postharvest quality of fresh fig fruit. *International Journal of Agriculture and Biology*. 2012. № 14 (5). P. 821–825.
- Kaur K., Dhillon W. S., Mahajan B. V. C. Effect of different packaging materials and storage intervals on physical and biochemical characteristics of pear. *Journal of food science and technology*. 2013. № 50 (1). P. 147–152. doi: 10.1007/s13197-011-0317-0
- Kaur K., Dhillon W. S., Mahajan B. V. C. Changes in pectin methyl esterase activity with different packaging materials and stages of fruit harvesting during cold storage of pear cv. Punjab beauty. *Journal of food science and technology*. 2014. № 51 (10). P. 2867–2871. doi: 10.1007/s13197-012-0773-1.
- Singh V. Storage studies in pear (Doctoral dissertation, CCSHAU). URL: <http://krishikosh.egranth.ac.in/handle/1/87780> (дата звернення 10.11.2021).
- Ullah H., Ahmad S., Anwar R., Thompson A. K. Effect of High Humidity and Water on Storage Life and Quality. *Int. International Journal of Agriculture and Biology*. 2006. № 8. P. 828–831.
- Методические рекомендации по хранению плодов, овощей и винограда. Организация и проведения исследований. Под общей ред. С. Ю. Дзенева, В. И. Иванченко. Ялта, Институт винограда и вина «Магарач». 1998. 152 с.
- Vyznachenno, yakiyi sort hrushi v Ukraini vyroshchuvaty nairentabelnishe [It has been determined which pear variety is the most profitable to grow in Ukraine]. Available at: <https://superagronom.com/news/5649-viznachenno-yakiy-sort-grushi-v-ukrayini-viroschuvati-nayrentabelnishe> (accessed 10.11.2021).
- Vplyv COVID-19 na rynek fruktiv i yahid u sezoni-2020/21 doslidzhennia rynku. [The impact of COVID-19 on the fruit and berry market in the 2020/21 season market research]. USAID “Competitive economy of Ukraine” (CEU). “VTrade Fruits and Berries” Initiative, 2020, 81 p.
- Osoblyvosti zberihannia hrush [Features of pear storage]. *Gardening news*, 2011, no. 4. Available at: <http://novsad.com/?p=872> (accessed 10.11.2021).
- Soltani M., Alimardani R., Mobli H., Mohtasebi S. S. Modified atmosphere packaging: a progressive technology for shelf-life extension of fruits and vegetables. *Journal of Applied Packaging Research*, 2015, Vol. 7, no. 3, pp. 33–59, doi: 10.13140/RG.2.1.2822.0887.
- Nath A., Deka B. C., Singh A., Patel R. K., Paul D., Misra L. K., Ojha H. Extension of shelf life of pear fruits using different packaging materials. *Journal of food science and technology*. 2012, Vol. 49, no. 5, pp. 556–563, doi: 10.1007/s13197-011-0305-4.
- Bouzo C. A., Travadelo M., Gariglio N. F. Effect of different packaging materials on postharvest quality of fresh fig fruit. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2012, Vol. 14, no. 5, pp. 821–825.
- Kaur K., Dhillon W. S., Mahajan B. V. C. Effect of different packaging materials and storage intervals on physical and biochemical characteristics of pear. *Journal of food science and technology*, 2013, Vol. 50, no. 1, pp. 147–152, doi: 10.1007/s13197-011-0317-0
- Kaur K., Dhillon W. S., Mahajan B. V. C. Changes in pectin methyl esterase activity with different packaging materials and stages of fruit harvesting during cold storage of pear cv. Punjab beauty. *Journal of food science and technology*, 2014, Vol. 51, no. 10, pp. 2867–2871, doi: 10.1007/s13197-012-0773-1.
- Singh, V. Storage studies in pear (Doctoral dissertation, CCSHAU). Available at: <http://krishikosh.egranth.ac.in/handle/1/87780> (accessed 10.11.2021).
- Ullah H., Ahmad S., Anwar R., Thompson A. K. Effect of High Humidity and Water on Storage Life and Quality. *Int. International Journal of Agriculture and Biology*, 2006, Vol. 8, pp. 828–831.
- Metodicheskie rekomendacii po hraneniju plodov, ovoshhej i vinograda. Organizacija i provedenija issledovanij [Methodological recommendations on the storage of fruits, vegetables and grapes. Organization and conducting of research]. Ed. S. Yu. Dzeneeva, V. I. Ivanchenko, Yalta, Institute of grapes and wine “Magarach”, 1998, 152 p.

References (transliterated)

- Kyshchuk O.-A. Nashi perspektyvy [Our prospects]. Available at: <https://agrotimes.ua/article/nashi-perspektyvy/>. (accessed 10.11.2021).

Відомості про авторів (About authors)

Заморська Ірина Леонідівна – доктор технічних наук, професор, Уманський національний університет садівництва, завідувача кафедрою технологій харчових продуктів; м. Умань, Україна; ORCID: 0000-0002-2767-1176; e-mail: zil197608@gmail.com.

Zamorska Iryna Leonidivna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of of Food Technologies, Head of the Department of Food Technologies, Uman national university of horticulture, Uman, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2767-1176; e-mail: zil197608@gmail.com.

Рибчак Олена Сергіївна – кандидат економічних наук, доцент, Уманський національний університет садівництва, доцент кафедри технологій харчових продуктів; м. Умань, Україна; ORCID: 0000-0002-8724-6673; e-mail: aryb4ak@gmail.com.

Rybchak Olena Sergiivna – Candidate of Sciences Economics (Ph. D.), Associate Professor, Department of Food Technologies, Associate Professor of the Department of Food Technologies, Uman national university of horticulture, Uman, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8724-6673; e-mail: aryb4ak@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Заморська І. Л., Рибчак О. С. Втрати маси та товарна оцінка плодів груші впродовж зберігання залежно від способу пакування. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 82-87. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.11.

Please cite this article as:

Zamorska I., Rybchak O. Weight loss and commodity evaluation of pear fruits during storage depending on the packaging method. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, 4 (10), pp. 82-87, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.11.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Заморская И. Л., Рыбчак Е. С. Потери массы и товарная оценка плодов груши во время хранения в зависимости от способа упаковки. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 82-87. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.11.

АННОТАЦІЯ Плоды груши обладают высокой биологической и пищевой ценностью, однако, относятся к скоропортящимся продуктам, хранение которых сопровождается определенными трудностями. Сохранить качество свежих плодов груши можно за счет применения различных способов упаковки, среди которых эффективным есть использование полиэтиленовых вкладышей. В статье представлены результаты исследований потерь массы и выхода товарной продукции плодов груши при хранении в зависимости от сорта и способа упаковки. Плоды груши сортов Конференция, Ноябрьская Молдовы и Основьянская высшего и первого товарного сорта предварительно охлаждали и упаковывали в деревянные ящики №3, емкостью до 25 кг (вариант «контроль») и в ящики с вложенным внутрь пакетом вкладышем из полиэтиленовой пленки толщиной 45-50 мкм с последующей герметизацией (вариант «ящик с полиэтиленовым вкладышем»). Хранили плоды груши в течение четырех месяцев при температуре $0 \dots + 3 \pm 1$ °С и относительной влажности воздуха 92 ± 2 %. Потери массы плодов определяли методом взвешивания фиксированных проб, выход товарной продукции – по ДСТУ 8326:2015. Установлено, что в период хранения плодов груши потери массы составили 2,3–5 %, в зависимости от сорта и способа упаковки. В разрезе помолологических сортов, по усредненным данным, самые высокие потери массы имели груши сорта Основьянская – 2,6%. Применение полиэтиленовых вкладышей при хранении груши способствовало уменьшению потерь на уровне 0,5–2,3% в зависимости от сорта и длительности хранения. Выявлено, что в условиях свободного доступа воздуха доля стандартной продукции составляла 78,6-88,3% с минимальным значением у плодов сорта Конференция и максимумом у плодов сорта Ноябрьская Молдовы. Доказано, что упаковка плодов груши в деревянные ящики с полиэтиленовыми вкладышами обусловила увеличение выхода товарной продукции до уровня 90,2–98,4%, уменьшение доли нестандартной продукции до 1,6-7,0% и отходов до 2,8%. Потери массы плодов груши сорта Ноябрьская Молдовы были на 0,3-1,5 ниже против аналогичных показателей других сортов. У плодов этого сорта зафиксирован более высокий выход товарной продукции – 88,3–98,4 % в зависимости от способа хранения.

Ключевые слова: хранение; груши; способ упаковки; потери массы; товарная продукция

Надійшла (received) 13.11.2021

УДК 504:613.2

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.12

СТАЛА ХАРЧОВА ПОВЕДІНКА

А. А. ІВАШУРА*, О. М. БОРИСЕНКО, М. В. ТОЛМАЧОВА

кафедра технологій і безпеки життєдіяльності, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, УКРАЇНА
*e-mail: ivashura.a@ukr.net

АНОТАЦІЯ Зважаючи на все зростаючий вплив сільського господарства та сучасної продовольчої промисловості на навколишнє природне середовище і зростаючу стурбованість з приводу всіх аспектів їх стійкості, потрібні негайні рішення у впровадженні здорового харчування з низьким рівнем впливу на навколишній світ. Сталі дієти – це дієти з низьким впливом на навколишнє середовище і високою доступністю, що забезпечують продовольчу безпеку та безпеку харчування. Пропонується всебічний огляд різних підходів до аналізу сталої харчової поведінки. Стверджується, що збереження навколишнього середовища має вирішальне значення, у тому числі при розробці програм для поліпшення здоров'я, усунення нерівності в цінній доступності, доступі та наявності продуктів харчування у моделях продовольчих систем. При цьому, дієтичні рекомендації та політика в галузі харчових продуктів не повинні ґрунтуватися виключно на екологічному аспекті сталості і повинні бути ретельно сформульовані. Економіка, культура та інші соціологічні чинники повинні враховуватися у відповідній політиці під час планування способів повноцінного забезпечення харчування населення. Підкреслюється, що для створення сталих продовольчих систем, що підтримують здорові співтовариства, необхідний багатовимірний міждисциплінарний підхід. Стала здорова дієта заснована на поліпшенні енергетичного балансу і зміні раціону харчування в бік переважно продуктів рослинного походження, що відповідає даним про здорове харчування. Оновлення національних рекомендацій з метою відображення останніх даних про здорове харчування може сама по собі мати важливе значення для поліпшення здоров'я і зниження впливу на навколишнє середовище та може не тільки чітко позначити, але й розширити критерії сталості. Ключові принципи сталості та благополуччя навколишнього середовища застосовуються при формуванні національної сталої харчової стратегії, безпосередньо пов'язані з виробництвом і споживанням харчових продуктів. Для впровадження інтегрованої структури моделювання здоров'я і навколишнього середовища необхідно застосовувати різні підходи до сталої харчування, мотивовані цілями у галузі навколишнього середовища, продовольчої безпеки та громадської охорони здоров'я. Для розробки методології з оцінки показників сталої харчування, важливе одночасне урахування усіх аспектів: харчової цінності продуктів, показників впливу на навколишнє середовище, доступність продуктів, кліматичні, географічні та національні особливості. Ця методологія дозволить приймати грамотні рішення у галузі виробництва та споживання харчових продуктів, допоможе мінімізувати негативний вплив на навколишнє природне середовище завдяки сталої харчової поведінки.

Ключові слова: харчування; здоров'я; екосистема; сталий розвиток; стала поведінка; продовольча безпека

SUSTAINABLE EATING BEHAVIOR

A. IVASHURA, O. BORYSENKO, M. TOLMACHOVA

Department of Technologies and Safety of Vital Activity, Simon Kuznets Kharkov National University of Economics, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT With the growing impact of agriculture and modern food processing on the natural environment and growing concerns about all aspects of their sustainability, urgent solutions are required to promote healthy, low-impact diets. Sustainable diets are those with low environmental impact and high availability that ensure food and nutritional security. A comprehensive overview of different approaches to the analysis of sustainable eating behavior is provided. It is argued that preserving the environment is critical, including in designing programs to improve health, address inequalities in affordability, food access and availability in food system models. However, dietary advice and food policy should not be based solely on the environmental aspect of sustainability and should be carefully formulated. Economy, culture and other sociological factors should be taken into account in appropriate policies when planning ways to provide adequate nutrition to the population. It is emphasized that building sustainable food systems that support healthy communities requires a multidimensional, interdisciplinary approach. A sustainable healthy diet is based on improving the energy balance and changing the diet towards a predominantly plant-based diet, which is in line with the data on healthy eating. Updating national guidelines to reflect the latest data on healthy diets may in itself be important for improving health and reducing environmental impact, and may not only clearly define but expand the criteria for sustainability. Key principles of environmental sustainability and well-being are applied in shaping a national sustainable food strategy and are directly related to food production and consumption. To implement an integrated health and environment modeling framework, it is necessary to take different approaches to sustainable nutrition, motivating environmental, food security and public health goals. To develop a methodology for assessing indicators of sustainable nutrition, it is important to simultaneously take into account all aspects: nutritional value of products, indicators of environmental impact, availability of products, climatic, geographic and national characteristics. This methodology will allow to make competent decisions in the field of food production and consumption, will help to minimize the negative impact on the natural environment through sustainable eating behavior.

Keywords: nutrition; health; ecosystem; sustainable development; sustainable behavior; food security

Вступ

Основою комплексного підходу для розв'язання сучасних екологічних проблем є сталість.

Тому, не дивно, що обговорення дієтичних рекомендацій, які оптимізують здоров'я, стає нерозривно пов'язаним зі сталістю. Стале харчування є важливою метою, стаючи більш ефективним

методом підтримки здоров'я без шкоди для навколишнього природного середовища, пропонуючи як різноманітність, так і доступність найбільш важливих продуктів для всіх. Для виконання цієї мети сільське господарство, продовольчі системи і сектори охорони здоров'я знаходяться в авангарді досягнень науки, інновацій та технологій. Так, на виробництві кожного галона молока в 2017 році зекономлено 30 % водних ресурсів, 21 % сільськогосподарських земель, 19 % викидів вуглекислого газу і 20 % відходів у порівнянні з 2007 роком [1].

Крім того, стале харчування – це тема, яка має політичне і міжнародне значення, оскільки країни по всьому світу стикаються з проблемами нестачі прісної води та родючих земель, негативним впливом кліматичного дисбалансу, а так само соціально-медицині проблемами, які включають недоїдання, зайву вагу і дефіцит поживних речовин. Ці причини стали підставою для запуску Цілей сталого розвитку Організації Об'єднаних Націй. При цьому одними з основних глобальних цілей вважаються різке скорочення масштабів убогості, голоду, зміни клімату та нерівності до 2030 року. В рамках цих цілей основна увага приділяється заходам щодо поліпшення здоров'я і добробуту з повсюдним впровадженням засад сталого сільського господарства. Таким чином, система охорони здоров'я та сталого харчування взаємопов'язані на всіх рівнях [2-4].

Ця концепція підкріплюється випуском звіту «Глобальний синдром ожиріння, недоїдання і зміни клімату», в якому говориться, що синергічні дії матимуть важливе значення для досягнення здоров'я на планеті [5].

Безсумнівно, і в майбутньому, у рекомендаціях та керівництвах по харчуванню обов'язково включатимуть питання сталості. Оцінка екологічної сталості та процес управління завжди виконуються для прийняття важливих рішень, які можуть вплинути на багато фундаментальних позицій. Цей глибокий аналіз не варто робити для простих або проміжних рішень, але це може бути корисно для прийняття цілісного підходу до забезпечення сталості даних рішень [6,7].

Мета роботи

Мета роботи – сформулювати сталу здорову дієту. Викласти ключові принципи сталості і добробуту навколишнього середовища, які можна застосовувати при формуванні національної сталої харчової стратегії. Описати методологію оцінки, наявності та доступності сталої продуктової групи товарів.

Виклад основного матеріалу

Для розрахунку варіантів сталого харчування використані наступні показники: водний слід, вуглецевий слід, вартість, харчова цінність, здоров'я.

У нашому випадку показник «харчова цінність» дорівнював показнику «здоров'я».

Для розгляду екологічних аспектів сталого харчування використовувалися показники водного і вуглецевого слідів. "Водний слід" визначається як загальний обсяг прісної води, що використовується для виробництва товарів і послуг. Кількість води, яка використовується для будь-якого продукту харчування, розраховувалося шляхом множення водного сліду на кількість споживаної їжі. «Вуглецевий слід» (міра загальної кількості викидів вуглекислого газу, яке прямо або побічно викликано будь-якою діяльністю або накопичується на всіх етапах життєвого циклу продукту) використовувався для розрахунку кількості викидів вуглекислого газу, що утворюється при виробництві харчових продуктів [8].

Дані по використаній прісній воді та викидів вуглекислого газу для кожного продукту харчування бралися з глобальної бази даних BCFN-DATABASE-FOR-DOUBLE-PYRAMID-2015 DEF1[9].

Показник вартості харчових продуктів розраховувався з даних Державної служби статистики України [10].

Показник харчової цінності відображає всю повноту корисних властивостей харчового продукту з урахуванням його споживання в загальноприйнятій кількості й брався з методики визначення хімічного складу та енергетичної цінності продуктів харчування і з відповідних таблиць [11].

Це дослідження показало, що харчування з урахуванням мінімального водного сліду було корисніше для здоров'я, ніж звичайне споживання, але з більш високою вартістю і вуглецевим слідом. Харчування з урахуванням мінімального вуглецевого сліду мало нижчу вартість і водний слід, але було менш корисним для здоров'я, ніж звичайне споживання. Харчування з урахуванням мінімальної вартості мало менший водний і вуглецевий слід, але і не було більш здоровим, ніж звичайне споживання. Нарешті, саме збалансоване і корисне для здоров'я харчування мало більш високий водний слід, вуглецевий слід і вартість (рис. 1).

Таким чином, визначення тільки однієї мети для створення універсальної моделі харчування не веде до сталого споживання, оскільки принаймні кілька цілей сталої дієти не може бути досягнуто. Це підтверджено і деякими альтернативними дослідженнями [12-16].

Отже, для визначення сталої харчової поведінки необхідний баланс між різними вимірами сталості.

Система сталого та здорового харчування розраховується з урахуванням основних показників як здоров'я людини, так і благополуччя навколишнього природного середовища. Це не означає, що населення в різних країнах має брати за основу одні й ті ж самі продукти для формування свого раціону. Навпаки, сталі схеми харчування виділяють групи продуктів, необхідні для формування здорового харчування і формування діапазону споживання цих продуктів,

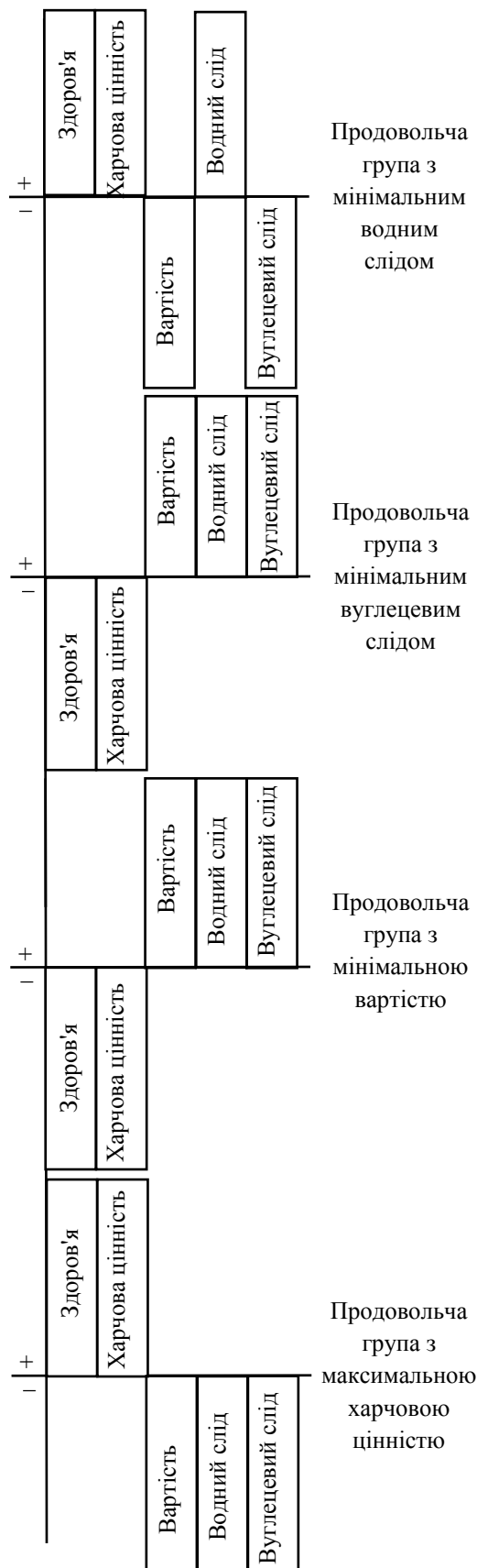


Рис. 1 – Ранжування варіантів сталого харчування за різними показниками

адаптуючи його до місцевих умов, відображаючи різноманітність екосистем, параметри клімату, а також культурні та демографічні особливості. Тому, порівнюючи дані наведені у табл. 1–2, ми бачимо деяку різницю між рекомендаціями МОЗ щодо здорового харчування для населення України [17] і рекомендаціями EAT-Lancet [5].

Отже, для визначення сталого споживання необхідний баланс між різними вимірами сталості. Така усвідомлена харчова поведінка, може привести до зниження загального обсягу використаної води і викидів вуглецю на 14%, зниження вартості продовольчого кошика на 23% і збільшення індексу харчової цінності на 7%. Стале споживання забезпечує добову потребу в енергії на рівні близько 2500 ккал в день, а так само рекомендовану кількість мікроелементів, вітамінів і рекомендований розмір порції продуктових груп відповідно до порад українських дієтологів.

Важливим моментом на наш погляд є кліматична сезонність в Україні та інших країнах, яка часто не враховується. Як правило пора року вносить свої зміни як на калорійність в харчуванні і доступність багатьох продуктів, так і на водні, вуглецеві та цінові показники.

Також необхідно враховувати етнічне різноманіття і різні кліматичні і ландшафтні зони в нашій країні. Таким чином, рекомендації зі сталого харчового споживання повинні мати більш широкий діапазон.

Стале харчування і сталі продовольчі системи давно вже вивчаються на міждисциплінарному рівні [18].

Незважаючи на те що вплив продовольчого сектора на процеси сталого розвитку широко визнано, зусилля з розробки й впровадження інтегрованої політики сталого виробництва та споживання харчових продуктів в Україні тільки починають розроблятися. Наприклад, у Стратегії продовольчої безпеки на період до 2030 р, компоненти основ сталого харчування лише частково згадуються або замінені на соціальні та економічні, а цілі обмежуються сприянням сталому розвитку сільського господарства. У цьому національному документі соціальним, політичним, економічним компонентам приділяється уся основна увага [19].

Входження України до Комітету з всесвітньої продовольчої безпеки ООН надасть додаткові можливості в екологізації як сільського господарства, так і сталого ставлення до продуктів.

Отже, для забезпечення сталого споживання харчових продуктів необхідні політичні дії в області продовольства і харчування. Для створення стійкої системи продовольства та харчування необхідно враховувати крім усього іншого і екологічні аспекти впливу харчових продуктів на навколишнє середовище.

Таблиця 1 – Порівняння споживання продуктів на одну людину на місяць з рекомендаціями EAT-Lancet Commission

Назва	Україна 2020 р.[20] кг / міс.	Рекомендації EAT-Lancet Commission кг / міс.	Різниця кг / міс.
М'ясо і м'ясопродукти, риба та рибопродукти	6,4	0 - 2,97	+ 3,43
Молочні продукти	18,8	7,5	+ 11,3
Яйця	20 шт.	15 шт.	+ 5 шт.
Цільні злаки (рис, пшениця, кукурудза, інше)	Немає даних	6,96	Немає даних
Хліб і хлібні продукти	8,0	Немає даних	Немає даних
Картопля	5,9	0 - 1,5	+ 4,4
Овочі	9,2	9,0	норма
Фрукти, горіхи	3,5	7,5	- 4,0
Рослинні жири	1,4	1,55	норма
Цукор	2,5	0 - 0,93	+ 1,57

Таблиця 2 – Порівняння споживання продуктів на одну людину на місяць з рекомендаціями МОЗ України

Назва	Україна 2020 р кг / міс.	Рекомендації МОЗ України кг / міс.	Різниця кг / міс.
М'ясо і м'ясопродукти, риба та рибопродукти	6,4	6,0	норма
Молочні продукти	18,8	12,0	+ 6,8
Яйця	20 шт.	30 шт.	- 10 шт.
Цільні злаки (рис, пшениця, кукурудза, інше)	Немає даних	2,4	Немає даних
Хліб і хлібні продукти	8,0	1,8*	+ 6,2
Картопля	5,9	6,0*	норма
Овочі	9,2	11,25	- 2,05
Фрукти, горіхи	3,5	9,0	- 5,5
Рослинні жири	1,4	2,1	- 0,7
Цукор	2,5	0 – 1,5	+ 1,0

* рекомендації дієтологів.

Висновки

Стала здорова дієта заснована на поліпшенні енергетичного балансу і зміні раціону харчування в бік переважно продуктів рослинного походження, що відповідає даним про здорове харчування. Оновлення національних рекомендацій з метою відображення

останніх даних про здорове харчування може сама по собі мати важливе значення для поліпшення здоров'я і зниження впливу на навколишнє середовище і може не тільки чітко позначити, але і розширити критерії сталості.

Ключові принципи сталості і благополуччя навколишнього середовища застосовуються при формуванні національної сталої харчової стратегії безпосередньо пов'язані з виробництвом і споживанням харчових продуктів. Для впровадження інтегрованої структури моделювання здоров'я і навколишнього середовища необхідно застосовувати різні підходи до сталого харчування, мотивовані цілями у галузі навколишнього середовища, продовольчої безпеки та громадської охорони здоров'я.

Для розробки методології з оцінки показників сталого харчування, важливий одночасний облік усіх аспектів: харчової цінності продуктів, показників впливу на навколишнє середовище, доступність продуктів, кліматичні, географічні та національні особливості. Ця методологія дозволить приймати грамотні рішення у галузі виробництва та споживання харчових продуктів.

Список літератури

1. Waite R., Rudee A. *6 Ways the US Can Curb Climate Change and Grow More Food*. URL: <https://www.wri.org/insights/6-ways-us-can-curb-climate-change-and-grow-more-food> (дата звернення 15.07.2021).
2. Smetana S. M., Bornkessel S., Heinz V. A Path From Sustainable Nutrition to Nutritional Sustainability of Complex Food Systems. *Frontiers in Nutrition*. 2019. Vol. 6. P. 1–6. doi: 10.3389/fnut.2019.00039.
3. Meybeck A., Gitz V. Sustainable diets within sustainable food systems. *Proceedings of the Nutrition Society*. 2017. Vol. 76 (01). P. 1–11. doi:10.1017/s0029665116000653.
4. Berry E. M., Dernini S., Burlingame B., Meybeck A., Conforti P. Food security and sustainability: can one exist without the other? *Public Health Nutrition*. 2015. № 18 (13). P. 2293–2302. doi:10.1017/s136898001500021x.
5. Food in the Anthropocene: the EAT – Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. URL: <https://www.thelancet.com/commissions/EAT> (дата звернення 18.07.2021).
6. Івашура А. А., Добрунова Л. Е. *Еколого-економічна та історична оцінка взаємовідносин людини і довкілля: монографія*. Харків: Вид. ХНЕУ, 2011. 152 с.
7. Івашура А. А., Винник О. П. *Еколого-економічний світогляд і традиції природокористування в українській культурі: монографія*. Харків: Вид. ХНЕУ, 2008. 91 с.
8. Wiedmann T., Minx J. A Definition of Carbon Footprint. 2008. In: C. C. Pertsova, *Ecological Economics Research Trends*: Ch.1. P.1-11. Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA. URL: https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=5999 (дата звернення 15.01.2021).
9. Barilla center. Recommendations for a sustainable diet-Database. URL: <https://www.barillacfn.com/m/publications/dp-2015-en.pdf> (дата звернення 15.01.2021).
10. Споживчі ціни на товари (послуги) URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення 20.07.2021).
11. Методика визначення хімічного складу та енергетичної цінності продуктів харчування. URL:

- <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0146-00/ed20000118#Text> (дата звернення 20.07.2021).
12. Eini-Zinab H., Sobhani S. R., Rezazadeh A. Designing a healthy, low-cost and environmentally sustainable food basket: an optimization study. *Public Health Nutrition*. 2021. Vol. 24(7). P. 1952-1961. doi: 10.1017/S1368980020003729.
 13. Parlesak A., Tetens I., Jensen, J. D., Smed S., Blenkuš M. G., Rayner M., Darmon N., Robertson A. Use of linear programming to develop cost-efficient minimized nutritionally adequate health promoting food baskets. *PLoS One*. 2016. Vol. 11(10). P. e0163411. doi: 10.1371/journal.pone.0163411.
 14. Mekonnen M. M., Hoekstra A. Y. A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems*. 2012. Vol. 15. P. 401–415. doi:10.1007/s10021-011-9517-8.
 15. Kenny Tiff-Annie., Fillion M., MacLean J., Wesche S. D., Chan H. M. Calories are cheap, nutrients are expensive – The challenge of healthy living in Arctic communities. *Food Policy*. 2018. Vol. 80(C). P. 39–54. doi: 10.1016/j.foodpol.2018.08.006.
 16. Donati M., Menozzi D., Zighetti C. Towards a sustainable diet combining economic, environmental and nutritional objectives. *Appetite*. 2016. Vol. 106. P. 8–57 doi: 10.1016/j.appet.2016.02.151.
 17. МОЗ України представило рекомендації зі здорового харчування. URL: <https://moz.gov.ua/article/news/moz-ukraini-predstavilo-rekomendacii-zi-zdorovogo-harchuvannja> (дата звернення 18.07.2021).
 18. Rohenkohl Do Canto N., Grunert K. G., de Barcellos M. D. Circular Food Behaviors: A Literature Review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13 (4). P. 1872. doi: 10.3390/su13041872.
 19. Проект розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Стратегії продовольчої безпеки на період до 2030 року» URL: <https://www.me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=33eec8aa-b768-4234-8f5d-7014601cf6e7&title=ProktRozporiadzhenniaKabinetuMinistrivUkrainiproSkhvalenniaStrategiiProdovolchoiBezpekiNaPeriodDo2030-Roku&isSpecial=true> (дата звернення 20.07.2021).
 20. Споживання продуктів харчування в домогосподарствах. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення 20.07.2021).
 6. Ivashura A. A., Dobrunova L. E. *Ekolohe-ekonomichna ta istorychna otsinka vzayemovidnosyn lyudyny i dovkillya: monohrafiya [Ecological, economic and historical assessment of the relationship between man and the environment: monograph]*. Kharkiv, 2011, 152 p.
 7. Ivashura A. A., Vynnyk O. P. *Ekolohe-ekonomichnyy svitohlyad i tradytsiyi pryrodokorystuvannya v ukrayins'kiy kul'turi : monohrafiya [Ecological and economic worldview and traditions of nature management in Ukrainian culture: monograph]*. Kharkiv, 2008, 91 p.
 8. Wiedmann T., Minx J. A Definition of Carbon Footprint. 2008. In: C. C. Pertsova, *Ecological Economics Research Trends*: Ch. 1, pp. 1–11. Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA. Available at: https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=5999 (accessed 15.01.2021).
 9. Barilla center. Recommendations for a sustainable diet-Database. Available at: <https://www.barillacfn.com/m/publications/dp-2015-en.pdf> (accessed 15.01.2021).
 10. Spozhyvchi tsiny na tovary (posluhy) [Consumer prices of goods (services)]. Available at: <http://www.ukrstat.gov.ua> (accessed 20.07.2021).
 11. Metodyka vyznachennya khimichnoho skladu ta enerhetychnoyi tsinnosti produktiv kharchuvannya [Methods for determining the chemical composition and energy value of food]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0146-00/ed20000118#Text> (accessed 20.07.2021).
 12. Eini-Zinab H., Sobhani S. R., Rezazadeh A. Designing a healthy, low-cost and environmentally sustainable food basket: an optimisation study. *Public Health Nutrition*, 2021, Vol. 24(7), pp. 1952–1961, doi: 10.1017/S1368980020003729.
 13. Parlesak A., Tetens I., Jensen, J. D., Smed S., Blenkus M. G., Rayner M., Darmon N., Robertson A. Use of linear programming to develop cost-efficient minimized nutritionally adequate health promoting food baskets. *PLoS One*, 2016, Vol. 11(10), pp. e0163411, doi: 10.1371/journal.pone.0163411.
 14. Mekonnen M. M., Hoekstra A. Y. A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems*, 2012, Vol.15, pp. 401-415, doi:10.1007/s10021-011-9517-8.
 15. Kenny Tiff-Annie, Fillion M., MacLean J., Wesche S. D., Chan H. M. Calories are cheap, nutrients are expensive – The challenge of healthy living in Arctic communities. *Food Policy*, 2018, Vol. 80(C), pp. 39–54, doi: 10.1016/j.foodpol.2018.08.006.
 16. Donati M., Menozzi D., Zighetti C. Towards a sustainable diet combining economic, environmental and nutritional objectives. *Appetite*, 2016, Vol. 106, pp. 8–57, doi: 10.1016/j.appet.2016.02.151.
 17. MOZ Ukrayiny predstavlylo rekomendatsiyi zi zdravoho kharchuvannya [The Ministry of Health of Ukraine presented recommendations on healthy eating]. Available at: <https://moz.gov.ua/article/news/moz-ukraini-predstavilo-rekomendacii-zi-zdorovogo-harchuvannja> (accessed 18.07.2021).
 18. Rohenkohl Do Canto N., Grunert K. G., de Barcellos M. D. Circular Food Behaviors: A Literature Review. *Sustainability*, 2021, Vol. 13 (4), pp. 1872, doi: 10.3390/su13041872.
 19. Proyeckt rozporjadzhennya Kabinetu Ministriv Ukrayiny "Pro skhvalennya Stratehiyi prodovol'choyi bezpeky na period do 2030 roku" [Draft order of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On approval of the Food Security

References (transliterated)

1. Waite R., Rudee A. *6 Ways the US Can Curb Climate Change and Grow More Food*. Available at: <https://www.wri.org/insights/6-ways-us-can-curb-climate-change-and-grow-more-food> (accessed 15.07.2021).
2. Smetana S. M., Bornkessel S., Heinz V. A Path From Sustainable Nutrition to Nutritional Sustainability of Complex Food Systems. *Frontiers in Nutrition*, 2019, Vol. 6, pp. 1–6, doi: 10.3389/fnut.2019.00039.
3. Meybeck A., & Gitz V. Sustainable diets within sustainable food systems. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2017, Vol. 76 (01), pp. 1–11, doi: 10.1017/s0029665116000653.
4. Berry E. M., Dermine S., Burlingame B., Meybeck A., Conforti P. Food security and sustainability: can one exist without the other? *Public Health Nutrition*, 2015, no.18 (13), pp. 2293–2302, doi: 10.1017/s136898001500021x.
5. Food in the Anthropocene: the EAT – Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. Available at: <https://www.thelancet.com/commissions/EAT> (accessed 18.07.2021).

Strategy for the period up to 2030"] Available at:
<https://www.me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=33eec8aa-b768-4234-8f5d-7014601cf6e7&title=ProktRozporiadzhenniaKabinetuMinistrivUkrainiproSkhval>

enniaStrategiiProdovolchoiBezpekiNaPeriodDo2030-Roku&isSpecial=true (accessed 20.07.2021).
20. Spozhyvannya produktiv kharchuvannya v domohospodarstvakh [Consumption of food in households]. Available at: <http://www.ukrstat.gov.ua> (accessed 20.07.2021).

Відомості про авторів (About authors)

Івашура Андрій Анатолійович – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, доцент кафедри технологій і безпеки життєдіяльності; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0022-7489>; e-mail: ivashura.a@ukr.net.

Andrii Ivashura – Candidate of Agricultural Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Technologies and Safety of Vital Activity, Simon Kuznets Kharkov National University of Economics, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0022-7489>; e-mail: ivashura.a@ukr.net.

Борисенко Оксана Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, доцент кафедри технологій і безпеки життєдіяльності; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2746-6797>; e-mail: onborisenko@ukr.net.

Oksana Borysenko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Doctoral Candidate, Department of Technologies and Safety of Vital Activity, Simon Kuznets Kharkov National University of Economics, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2746-6797>; e-mail: onborisenko@ukr.net.

Толмачова Марина Володимирівна – студент, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця; м. Харків, Україна; e-mail: mrn.tlmchv1609@gmail.com.

Maryna Tolmachova – student, Simon Kuznets Kharkov National University of Economics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: mrn.tlmchv1609@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Івашура А. А., Борисенко О. М., Толмачова М. В. Стала харчова поведінка. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 88-93. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.12.

Please cite this article as:

Ivashura A., Borysenko O., Tolmachova M. Sustainable eating behavior. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4(10), pp. 88-93, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.12.

Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Івашура А. А., Борисенко О. М., Толмачова М. В. Устойчивое пищевое поведение. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 88-93. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.12.

АННОТАЦІЯ Приймаючи увагу на зростаюче впливання сільського господарства і сучасної продовольственої промисловості на оточуючу природну середовище і зростаючу обуреність по відношенню до всіх аспектів їх стійкості, потребуються негайні рішення в просуванні здорового харчування з низьким рівнем впливу на оточуючий світ. Стійкі дієти – це дієти з низьким впливом на оточуючу середовище і високою доступністю, які забезпечують продовольствену безпеку і безпеку харчування. Пропонується всебічний огляд різних підходів до аналізу стійкого харчового поведіння. Підтверджується, що збереження оточуючої середовища має вирішальне значення, в тому числі при розробці програм для покращення здоров'я, усунення нерівності в ціновій доступності, доступу і наявності продуктів харчування в моделях продовольствених систем. При цьому дієтичні рекомендації і політика в області харчових продуктів не повинні ґрунтуватися виключно на екологічному аспекті стійкості і повинні бути ретельно сформульовані. Економіка, культура і інші соціологічні фактори повинні враховуватися в відповідній політиці при плануванні способів повноцінного забезпечення харчування населення. Підкреслюється, що для створення стійких продовольствених систем, що підтримують здорове суспільство, необхідний багатомірний міждисциплінарний підхід. Стійка здорова дієта ґрунтується на покращенні енергетичного балансу і зміні раціону харчування в бік переважно рослинного походження, що відповідає даним про здорове харчування. Оновлення національних рекомендацій з метою врахування останніх даних про здорове харчування може не тільки чітко визначити, але і розширити критерії стійкості. Ключові принципи стійкості і благополуччя оточуючої середовища застосовуються при формуванні національної стійкої харчової стратегії і безпосередньо пов'язані з виробництвом і споживанням харчових продуктів. Для впровадження інтегрованої структури моделювання здоров'я і оточуючої середовища необхідно застосовувати різні підходи до стійкого харчування, мотивуючи цілями в області оточуючої середовища, продовольственої безпеки і громадського здоров'я. Для розробки методології оцінки показників стійкого харчування, важливим є одночасний урахування всіх аспектів: харчової цінності продуктів, показників впливу на оточуючу середовище, доступності продуктів, кліматичні, географічні і національні особливості. Ця методологія дозволить приймати грамотні рішення в області виробництва і споживання харчових продуктів, що допоможе мінімізувати негативний вплив на оточуючу природну середовище завдяки стійкому харчовому поведінню.

Ключові слова: харчування; здоров'я; екосистема; стійке розвиток; стійке поведіння; продовольствена безпека

Надійшла (received) 21.10.2021

УДК 664.6.7:663.522:664.68

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.13

ВИКОРИСТАННЯ БОРОШНА ІЗ НАСІННЯ НИШЕВИХ КУЛЬТУР У ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА КЕКСІВ

Н. А. СОВА*, К. А. ХУДАЙБЕРДІЄВА, Н. В. КОВАЛЕНКО, І. Р. МИХНЕНКО

кафедра технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, УКРАЇНА

*e-mail: sova.n.a@dsau.dp.ua

АНОТАЦІЯ Борошняні кондитерські вироби займають чільне місце у харчуванні населення нашої країни й у світі та користуються значним попитом. Істотним недоліком цієї групи продуктів є низький вміст життєво необхідних есенційних речовин, таких як вітаміни, мінеральні речовини, харчові волокна тощо, і високий вміст вуглеводів та ліпідів. Попит на ці вироби обумовлює необхідність до коригування хімічного складу даних харчових продуктів. Одним із найвідоміших представників борошняних кондитерських виробів є кекси. У рецептурах кексів найбільша частка припадає на такі види рафінованої сировини, як борошно пшеничне, цукор-пісок, жири, що обумовлюють незбалансованість їх хімічного складу, низьку поживну (харчову) цінність та високу калорійність. У якості біологічно активних добавок рослинного походження до рецептури кексів можна додавати борошно із насіння різних нішевих культур (льону, конопель, кунжуту, амаранту тощо). Адже даний вид сировини цінний своїм складом (вмістом білків, жирів, незамінних амінокислот та жирних кислот, вітамінів, мінеральних речовин тощо) та оздоровчими властивостями. Розроблено рецептури кексів, збагачених борошном із насіння нішевих культур. Прототипом для дослідження обрана рецептура кексу «Столичний». У якості сировини обрано конопляне, лляне, гарбузове та кунжутне борошно. Визначено органолептичні, фізико-хімічні показники якості, поживну та енергетичну цінність готових виробів. За результатами органолептичної оцінки зразків кексів, визначення їх фізико-хімічних показників якості, порівняння з виробничим зразком, нами рекомендовано до впровадження кекс, збагачений знежиреним конопляним борошном. Вміст білків у даному зразку становив 8,85 г/100 г, жирів – 17,83 г/100 г, вуглеводів – 51,8 г/100 г, енергетична цінність – 396,85 кКал/ 100 г продукту. Завдяки функціональним властивостям конопляного борошна отриманий продукт можна віднести до продуктів оздоровчого призначення.

Ключові слова: кекси; конопляне борошно; лляне борошно; кунжутне борошно; гарбузове борошно

THE USAGE OF NICHE SEEDS FLOUR IN CUPCAKE PRODUCTION TECHNOLOGY

N. SOVA, K. KHUDAIBERDIEVA, N. KOVALENKO, I. MYKHENKO

Department of storage and processing technology of agricultural products, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, UKRAINE

ABSTRACT Flour confectionery products occupy an important place in the diet of the population of our country, and the world and are in great demand. A significant disadvantage of this group of products is the low content of vital essential substances, such as vitamins, minerals, dietary fiber, etc., and the high content of carbohydrates and lipids. Demand for these products necessitates the need to adjust the chemical composition of these foods. One of the most famous representatives of flour confectionery is cupcakes. In the recipes of cupcakes, the largest share occupies such types of refined raw materials like wheat flour, granulated sugar, fats, which cause an imbalance in their chemical composition, low nutritional value, and high caloric content. As biologically active additives of plant origin, flour from the seeds of various niche crops (flax, hemp, sesame, amaranth, etc.) can be added to the cupcake recipe. After all, this type of raw material is valuable for its composition (the content of proteins, fats, essential amino acids, and fatty acids, vitamins, minerals, etc.) and health properties. The recipe for cupcakes enriched with flour from the seeds of niche crops has been developed. The prototype for the study was chosen recipe for the cake "Stolychnyi". Hemp, flax, pumpkin, and sesame flour were chosen as raw materials. Organoleptic, physicochemical quality indicators, nutritional, and energy value of finished products are determined. Based on the results of the organoleptic evaluation of cupcake samples, determination of their physicochemical quality indicators, comparison with the production sample, we recommended the introduction of a cupcake enriched with low-fat hemp flour. The protein content in this sample was 8.85 g/100 g, fat – 17.83 g/100 g, carbohydrates – 51.8 g/100 g, energy value – 396.85 kCal / 100 g of product. Due to the functional properties of hemp flour, the resulting product can be attributed to health products.

Keywords: cupcakes; hemp flour; flaxseed flour; sesame flour; pumpkin flour

Вступ

Борошняні кондитерські вироби займають чільне місце у харчуванні населення нашої країни й у світі та користуються значним попитом. Істотним недоліком цієї групи продуктів є низький вміст життєво необхідних есенційних речовин, таких як вітаміни, мінеральні речовини, харчові

волокна тощо, і високий вміст вуглеводів та ліпідів. Попит на ці вироби обумовлює необхідність до коригування хімічного складу даних харчових продуктів. Використовуючи нетрадиційні інгредієнти, рецептуру цієї групи виробів можливо моделювати та створити харчові

продукти, збагачені біологічно активними речовинами [1].

Кекси – це висококалорійні борошняні кондитерські вироби, об'ємної форми, виготовлені на основі борошна, цукру, жиру та яйцепродуктів, які можуть включати крупні і/або дрібні добавки (родзинки, горіхи, цукати тощо), начинки та декорування поверхні.

У рецептурах кексів найбільша частка припадає на такі види рафінованої сировини, як борошно пшеничне, цукор-пісок, жири, що обумовлюють незбалансованість їх хімічного складу, низьку поживну (харчову) цінність та високу калорійність. Необхідною умовою підвищення споживчих властивостей борошняних кондитерських виробів є збагачення їх сировиною, яка характеризується біологічно активними властивостями [2].

Технології виробництва кексів схожі між собою. Багато вчених світу займаються дослідженнями, які спрямовані на розширення асортименту кексів саме оздоровчого призначення за рахунок використання різноманітних інгредієнтів та добавок рослинного походження: борошна рисового [3–5], гречаного [4,6], вівсяного, кукурудзяного [5,7], кокосового [8]; клітковини пшеничної, яблучної [9]; морквяного порошку [10]; різних фітокомпозицій [3, 11,12]; олії кунжутної [13], зародків пшениці, рижієвої [9]; насіння чіа [4]; протеїну кіноа [14]; солоду житнього [15]; пророщеного насіння обліпихи [16], діетичних волокон або висівок з пшениці, вівса, ячменю і кукурудзи [17]; екстракту стевії [18], гібіскусу [19], меліси [20]; бурих водоростей [21]; коренеплодів батату [22] та цукрового буряку [23] тощо. На нашу думку у якості біологічно активних добавок рослинного походження до рецептури кексів можна додавати борошно із насіння різних нішевих культур (льону, конопель, кунжуту, амаранту тощо). Адже даний вид сировини цінний своїм складом та оздоровчими властивостями.

Мета роботи

На підставі аналізу відомих науково-технічних рішень і патентного огляду сформульовано мету дослідження – розроблення рецептури кексів, збагачених борошном із насіння нішевих культур. У якості сировини обрано конопляне, лляне, гарбузове та кунжутне борошно. Для досягнення мети дослідження поставлено наступні задачі, а саме: виготовити дослідні зразки кексів, провести їх органолептичну оцінку; визначити та порівняти фізико-хімічні показники якості дослідних зразків кексів; визначити енергетичну та поживну (харчову) цінність готових виробів та порівняти її з виробничим зразком.

Матеріали і методи дослідження

Сировиною для проведення досліджень було борошно пшеничне згідно ДСТУ 46.004–99 «Борошно пшеничне. Технічні умови»; яйця курячі згідно ДСТУ 5028:2008 «Яйця курячі харчові. Технічні умови»; масло вершкове згідно ДСТУ 4399:2005 «Масло вершкове»; ванільний цукор згідно ДСТУ 1009:2005 «Цукор ванільний»; розпушувач тіста, вироблений МПП фірмою «Ямуна» згідно ТУ У 15.8-30352116-013-2004; цукор-пісок згідно ДСТУ 2316–93 «Цукор-пісок. Технічні умови»; сіль кухонна згідно ДСТУ 3583:97 «Сіль кухонна. Загальні технічні умови»; сушена журавлина згідно ДСТУ 8471:2015 «Фрукти кісточкові сушені. Технічні умови»; напівзнежирене конопляне борошно ТМ «Native Oil»; лляне, кунжутне та гарбузове борошно ТМ «Сто пудов».

Прототипом для дослідження обрана рецептура кексу «Столичний». Тісто для кексів замішували наступним чином: збивали нагріте до температури 40 °С масло вершкове, додавали цукор-пісок, знову збивали, поступово додавали яйця, продовжували збивати. Потім додавали сушену журавлину, цукор ванільний, розпушувач, сіль, все ретельно перемішували. У отриману масу всипали просіяне борошно із насіння нішевих культур, витримували 15 хв, далі додавали просіяне борошно пшеничне вищого сорту, замішували тісто. Заповнювали форми тістом до половини. Випікали при температурі 200 °С протягом 20 хв [24].

Визначення фізико-хімічних та органолептичних показників кексів на відповідність ДСТУ 4505:2005 «Кекси. Загальні технічні умови» проводили згідно ДСТУ 4683:2006 «Вироби кондитерські. Методи визначення органолептичних показників якості, розмірів, маси нетто і складових частин», ДСТУ 4910:2008 «Вироби кондитерські. Методи визначення масових часток вологи та сухих речовин», ДСТУ 4672:2006 «Вироби кондитерські. Методи визначення золи і металоманітних домішок», ДСТУ 5060:2008 «Вироби кондитерські. Методи визначення масової частки жиру».

Вміст вуглеводів та енергетичну цінність зразків кексів визначали розрахунковим методом.

Величину упікання визначали за різницею між масою тіста перед посадкою в піч та масою готового гарячого борошняного виробу.

Коефіцієнт підйому тіста визначали відношенням висоти виробу до та після випікання.

Виклад основного матеріалу

З кожним роком в Україні все більше розширюється асортимент борошна із зерна та насіння нішевих культур, такого як конопляне,

нутове, кунжутне, соргове, гарбузове, амарантове та інші. Вчені України та світу займаються дослідженнями складу, фізико-хімічних властивостей та сфер застосування борошна із зерна та насіння нішевих культур [25–29]. Нами обрано для дослідження конопляне, лляне, кунжутне та гарбузове борошно.

Конопляне борошно містить більше 35 % білків. Ліпідів, мінеральних речовин, волокон у конопляному борошні міститься більше, ніж у пшеничному. У складі даного борошна переважають такі мінеральні речовини, як Калій, Кальцій, Магній, Фосфор, Ферум та Манган. Основними ненасиченими жирними кислотами є лінолева, олеїнова та γ -лінолева кислоти. Що стосовно амінокислотного складу, то в конопляному борошні міститься найбільша кількість глютамінової кислоти. Вуглеводи, представлені великим вмістом сахарози, глюкози та фруктози [25].

Вміст білків в лляному борошні становить 23 г на 100 г продукту. Білки лляного борошна мають високу біологічну цінність. Незважаючи на те, що білок не є повноцінним, СКОР лізину становить 90 %. Есенціальні поліненасичені жирні кислоти представлені α -ліноленою та лінолевою кислотами, вміст фенольних кислот становить від 7,9–10,3 мг/г. Вони мають протипухлинну й протизапальну дію. Крім того, до складу лляного борошна входять: клітковина (до 30 %), вітаміни, мікроелементи (Кальцій, Калій, Магній, Фосфор) й велика кількість лігнанів, які містяться в насінній оболонці льону та виявляють антиоксидантні властивості. Кількість клітковини становить приблизно 28 % сухої маси лляного борошна [26].

Найвищий вміст гліцину відмічений у кунжутному борошні. Мононенасичені жирні кислоти у кунжутному незнежиреному борошні представлені пальмітолеїною та олеїною (ω -9) кислотами. Забарвлення кунжутного насіння впливає на хімічний склад борошна. Із поліненасичених жирних кислот найбільший вміст лінолевої встановлено у насінні чорного кольору – 19,5 г, лише на 0,2 г менше у білого та 0,5 г – у золотистого [27].

Гарбузове борошно має високий вміст вуглеводів (79,57 %), крохмалю (48,30 %), харчових волокон (12,1 %), білків (7,81%), золи (5,29 %), низький вміст ліпідів (3,60 %) та сирі клітковини (3,65 %). Вітамін А в гарбузовому борошні наявний в кількості 48,30 мкг/100 г [28].

Дані види борошна відзначаються вологоутримувальними властивостями та відсутністю глютену. Загальні результати свідчать про потенціал використання конопляного, лляного, кунжутного та гарбузового борошна у якості збагачувачів або основної сировини для виробництва борошняних

кондитерських виробів функціонального призначення.

У роботі використовували 17 рецептур кексів:

- зразок №1 (контрольний) – кекс «Столичний»;
- зразки №2, №3, №4, №5 – кекси із заміною 100 %, 75 %, 50 % і 25 % пшеничного борошна конопляним відповідно;
- зразки №6, №7, №8 і №9 – кекси із заміною 100 %, 75 %, 50 % і 25 % пшеничного борошна лляним відповідно;
- зразки №10, №11, №12 і №13 – кекси із заміною 100 %, 75 %, 50 % і 25 % пшеничного борошна кунжутним відповідно;
- зразки №14, №15, №16 і №17 – кекси із заміною 100 %, 75 %, 50 % і 25 % пшеничного борошна гарбузовим відповідно;
- зразок №18 – виробничий зразок конопляного кексу.

Безпосередньо після виготовлення кексів провели дослідження їх якості.

Результати та їх обговорення

Органолептичні показники якості визначали за наступними показниками: форма, поверхня, колір, вид у зломі, смак та запах. Органолептичні показники якості зразків №1, №3, №4, №5, №9, №13 та №18 відповідали вимогам ДСТУ 4505:2005 «Кекси. Загальні технічні умови», а зразків №12, №16 та №17 не відповідали вимогам даного нормативного документу за смаком; зразку №2 – за запахом; зразків №6, №7, №10, №14, №15 – за формою, поверхнею, видом у розломі, смаком та запахом; зразків №8 та №11 – за поверхнею, запахом та смаком. Оцінивши результати органолептичного аналізу, було вирішено встановити органолептичні показники якості готових виробів з використанням бальної оцінки. Форма, поверхня, колір, вигляд у розломі, запах та смак зразків №1, №4, №5 та №9 оцінено краще за всі інші. В інших зразках результати різнилися (рис. 1).



Рис. 1 – Загальна органолептична оцінка зразків кексів

Після визначення органолептичних показників якості вирішено дослідити фізико-хімічні показники якості в зразках кексів №1, №5 та №9 (табл. 1).

З табл.1 можна зробити висновок, що вологість та масова частка жиру в наведених дослідних зразках відповідали вимогам ДСТУ 4505:2005 «Кекси. Загальні технічні умови». Вміст білків і жирів у дослідних зразках кексів, збагачених конопляним та лляним борошном, більший у порівнянні з контрольним зразком. Але зразок кексу, збагачений лляним борошном не відповідає вимогам ДСТУ 4505:2005 «Кекси. Загальні технічні умови» за масовою часткою золи, нерозчинної в розчині з масовою часткою соляної кислоти 10 %.

Таблиця 1 – Характеристика фізико-хімічних показників якості зразків кексів

Назва показника	Зразок кексів			За ДСТУ 4505:2005
	№1	№5	№9	
Масова частка протеїну*, г/100 г	8,10	8,85	10,18	-
Масова частка жиру*, г/100 г	16,31	17,83	19,00	2,2–34,2
Масова частка вуглеводів, г/100 г	55,88	51,80	54,43	-
Загальний вміст золи*, г/100 г	1,31	1,74	1,73	-
Масова частка золи, нерозчинної в розчині з масовою часткою соляної кислоти 10 %, %	0,01	0,10	1,38	≤0,1
Масова частка вологи, %	22,0	20,6	20,4	10–31
Коефіцієнт підйому тіста	0,53	0,35	0,62	-
Величина упікання, г	4,8	5,87	5,21	-

* в перерахунку на сухі речовини

Збільшення вмісту білків в складі харчових продуктів має позитивний вплив на організм людини через те, що до їх складу входять незамінні амінокислоти. Збільшення вмісту жиру має і позитивний і негативний характер: наявні в його складі ненасичені жирні кислоти мають оздоровчий вплив на організм людини, але високий вміст жиру в харчових продуктах призводить до швидкого їх псування.

Порівняльна характеристика поживної (харчової) та енергетичної цінностей зразків кексів №1, №5 та №9 з виробничим зразком конопляного кексу «Нарру Leaf» наведено в таблиці 2.

З табл. 2 видно, що дослідні зразки кексів переважають виробничий зразок за вмістом білків та вуглеводів. Вміст жиру у виробничому зразку значно більший, ніж у дослідних зразках. Крім того, його енергетична цінність вище.

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика дослідних з виробничим зразком кексів

№ зразку кексів	Вміст			Енергетична цінність, кКал/100 г
	білків, г/100 г	жирів, г/100 г	вуглеводів, г/100 г	
№1 (контрольний)	8,10	16,31	55,88	396,97
№5 (збагачений конопляним борошном)	8,85	17,83	51,8	396,85
№9 (збагачений лляним борошном)	10,18	19,00	54,43	423,92
№18 (виробничий зразок)	6,50	30,90	45,80	487,00

Висновки

Підводячи підсумки, а саме результати органолептичної оцінки зразків кексів, визначення їх фізико-хімічних показників якості, порівняння з виробничим зразком, нами рекомендовано до впровадження зразок №5 – кекс, збагачений знежиреним конопляним борошном, який можна віднести до продуктів оздоровчого призначення.

Список літератури

- Дзюндзя О. В. Технологія кексів функціонального призначення. *Modern directions of theoretical and applied researches 2016: матеріали конференції*, 15–22 березня 2016 р. Херсон. Херсонський державний університет, 2016. С. 25–35.
- Лебединець В. Т., Гаврилишин В. В., Лебединець А. І. Вплив попошків з айви звичайної і хеномелесу на якість кексів. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. 2019. № 22. С. 58–63.
- Кочерга В. І., Назар М. І. Пат. 64456, Україна. Кекс. 2011.
- Мацук Ю. А., Колпікова Є. О., Іщенко Н. В. Обґрунтування технології безглютенових кексів із додаванням насіння чіа. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі*. 2019. № 1 (91). С. 8–14. doi: 10.36477/2522-1221-2021-26-09
- Юдіна Т. І., Безрученко О. М., Агапова О. В. Безглютенові кекси з борошном круп'яних культур. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2020. №1 (40). С. 19–25. doi: 10.33274/2079-4827-2020 -40-1-19-25
- Дорохович А. М., Бабіч О. В., Дорохович В. В. Пат. 20733, Україна. Кекс Безглютеновий. 2007.
- Сиза О. І., Савченко О. М., Михуля І. М. Пат. 125949, Україна. Кекс Вівсяно-кукурудзяний. 2018.
- Дітріх І. В., Цокало В. А. Пат. 12575, Україна. Безглютеновий кекс спеціального призначення. 2018.
- Дітріх І. В., Цокало В. А. Пат. 125752, Україна. Безглютеновий шоколадний кекс спеціального призначення. 2018.
- Коваль О. В., Губеня В. О., Павлюченко О. С., Машовець М. Ю. Пат. 113332, Україна. Кекс чайний з морквою. 2017.

11. Сирохман І. В., Лозова Т. М., Ковальчук Х. І. Пат. 69064, Україна. Кекс Чорничний. 2012.
12. Singh V., Kumar S., Singh J., Rai A. K. Fuzzy logic sensory evaluation of 2 cupcakes developed from the mahua 3 flower (*madhuca longifolia*). *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*. 2018. Vol. 5 (1), P. 411–421. doi: 10.15587/1729-4061.2019.174828.
13. Сирохман І. В., Лозова Т. М., Ковальчук Х. В., Ковбаса В. М., Кияниця С. Г. Пат. 68297, Україна. Кекс Кунжутний. 2012.
14. Lopez-Alarcon C. A., Cerdan-Leal M. A., Beristain C. I., Pascual-Pineda L. A. The potential use of modified quinoa protein isolates in cupcakes: physicochemical properties, structure and stability of cupcakes. *Food & Function*. 2019. Vol. 10 (7), P. 4432–4439. doi:10.1039/C9FO00852G.
15. Романченко Н. М., Риндін А. В., Павлюченко О. С. Доцільність використання солоду житнього ферментованого в технології кексів. *Харчова промисловість*. 2019. № 25. С.39–45. doi:10.24263/2225-2916-2019-25-7.
16. Золотарева А. М., Ринчинова С. Б., Нямдорж Б. Пат. 2547471, Україна. Кекс «РОСТИК». 2015.
17. Lebesi D. M., Tzia C. Effect of the Addition of Different Dietary Fiber and Edible Cereal Bran Sources on the Baking and Sensory Characteristics of Cupcakes. *Food and Bioprocess Technology*. 2011. Vol. 4, P. 710–722. doi:10.1007/s11947-009-0181-3.
18. Стеценко Н. О., Вінок А. В. Аналіз харчової та біологічної цінності кексів, збагачених екстрактом стевії та шротом насіння льону. *Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки: технології, якість та безпека: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф.*, 2–29 трав. 2015. Київ: НУХТ, 2015. С. 123–124.
19. Abdel-Moemin A. R. Effect of Roselle calyces extract on the chemical and sensory properties of functional cupcakes. *Food Science and Human Wellness*. 2016. Vol. 5 (4). P. 230–237. doi: 10.1016/j.fshw.2016.07.003.
20. Caleja C., Barros L., Barreira J. C. M., Ciric A., Sokovic M. Suitability of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) extract rich in rosmarinic acid as a potential enhancer of functional properties in cupcakes. *Food Chemistry*. 2018. Vol. 250. P. 67–74. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.01.034.
21. Шаран Л. О., Бура Г. М. Пат. 73942, Україна. Кекс, збагачений бурими водоростями ASCOPHYLLUM NODOSUM. 2012.
22. Горобець О. М., Левченко Ю. В., Бородай А. Б., Чоні І. В. Використання батату в технології виробів з кексового тіста. *Науковий вісник ЛНУВМБ імені С.З. Гжицького. Серія: Харчові технології*. 2020. Т. 22. № 94. С. 13–17. doi: 10.36477/2522-1221-2021-25-16.
23. Jabborova S. K., Isabaev I. B., Djuraeva N. R., Kurbanov M. T., Khaydar-Zade I. N., Rakhmonov K. S. Application of products of processing mulberries and roots of sugar beet in the production of cupcakes. *Journal of Critical Reviews*. 2020. Vol. 7(9), P. 277–286. doi: 10.31838/jcr.07.09.61.
24. Лисюк Г. М., Самохвалова О. В., Кучерук З. І. та ін. Технологія борошнаних кондитерських і хлібобулочних виробів: навч. посібник. Харків: ХДУХТ, 2008. С. 412–415.
25. Rusu I.-E., Marc R.A., Mureşan C. C., Mureşan E., Filip M. R., Onica V.-M., Csaba K. B., Alexa E. Advanced Characterization of Hemp Flour (*Cannabis sativa* L.) from Dacia Secuieni and Zenit Varieties, Compared to Wheat Flour. *Plants*. 2021. Vol. 10 (6). P. 1237–1249. doi:10.3390/plants10061237.
26. Євлаш В. В., Газзаві-Рогозіна Л. В., Сєногонова Л. І. Удосконалення технології печива пісочного з використанням лляного борошна. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2021. № 1 (33). С. 187–198. doi: 10.5281/zenodo.5043572.
27. Євчук Я. В., Кононенко Л. М., Войтовська В. І., Третьякова С. О. Амінокислотний склад незнежиреного борошна кунжутного та перспективи його використання у виробництві органічних продуктів спеціального призначення. *Агробіологія*. 2021. № 1 (163), С. 41–48. doi: 10.33245/2310-9270-2021-163-1-41-48.
28. Saeleaw M., Schleining G. Composition, Physicochemical and Morphological Characterization of Pumpkin Flour. *Food process engineering in a changing world: 11th International Congress on Engineering and Food*, April 10–13. Athens, 2011. P. 1–5.
29. Jamieson J. A., Viana L., English M. M. Folate Content and Chemical Composition of Commercially Available Gluten-Free Flour Alternatives. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2020. Vol. 75, P. 337–343. doi: 10.1007/s11130-020-00833-z.

References (transliterated)

1. Dziundzia O. V. Tekhnolohiia keksiv funktsionalnoho pryznachennia [Functional cupcake technology]. *Modern directions of theoretical and applied researches 2016: materialy konferentsii, 15 – 22 bereznia 2016*. Kherson. Khersonskiy derzhavnyi universytet, 2016, pp. 25–35.
2. Lebedynets V. T., Havrylyshyn V. V., Lebedynets A. I. Vplyv poproshkiv z aivy zvychainoi i khenomelesu naiakist keksiv [Influence of quinces of quince and henomelesu on the presence of cupcakes]. *Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, 2019, no. 22, pp. 58–63.
3. Kocherha V. I., Nazar M. I. Pat. 64456, Ukraina. Keks, 2011.
4. Matsuk Yu. A., Kolpikova Ye. O., Ishchenko N. V. Obgruntuvannia tekhnolohii bezghliutenovykh keksiv iz dodavanniam nasinnia chia [Substantiation of gluten-free cupcake technology with the addition of chia seeds]. *Scientific Bulletin of Poltava University of Economics and Trade*, 2019, № 1 (91), pp. 8–14, doi: 10.36477/2522-1221-2021-26-09.
5. Yudina T. I., Bezruchenko O. M., Ahapova O. V. Bezghliutenovi keksy z boroshnom krupianykh kultur [Gluten-free muffins with cereal flour]. *Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv [Equipment and technologies of food production]*. 2020, no. 1 (40), pp. 19–25, doi: 10.33274/2079-4827-2020 -40-1-19-25.
6. Dorokhovych A. M., Babich O. V., Dorokhovych V. V. Pat. 20733, Ukraine. *Keks Bezghliutenovyi [Gluten Free Cupcake]*, 2007.
7. Syza O. I., Savchenko O. M., Mykhulia I. M. Pat. 125949, Ukraine. *Keks Vivsiano-kukurudzianyi [Oatmeal and corn cupcake]*, 2018.
8. Ditrikh I. V., Tsokalo V. A. Pat. 12575, Ukraine. *Bezghliutenovyi keks spetsialnoho pryznachennia [Gluten-free cake for special purposes]*, 2018.
9. Ditrikh I. V., Tsokalo V. A. Pat. 125752, Ukraine. *Bezghliutenovyi shokoladni keks spetsialnoho pryznachennia [Gluten-free chocolate cake for special purposes]*, 2018.

10. Koval O. V., Hubenia V. O., Pavliuchenko O. S., Mashovets M. Yu. Pat. 113332, Ukraine. *Keks chainyi z morkvoiu [Tea cupcake with carrots]*, 2017.
11. Syrokhman I. V., Lozova T. M., Kovalchuk Kh. I. Pat. 69064, Ukraine. *Keks Chornychnyi [Blueberry Cupcake]*, 2012.
12. Singh V., Kumar S., Singh J., Rai A. K. Fuzzy logic sensory evaluation of 2 cupcakes developed from the mahua 3 flower (*Madhuca longifolia*). *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, 2018, Vol. 5 (1), pp. 411–421, doi: 10.15587/1729-4061.2019.174828.
13. Syrokhman I. V., Lozova T. M., Kovalchuk Kh. V., Kovbasa V. M., Kyianytsia S. H. Pat. 68297, Ukraine. *Keks Kunzhutnyi [Sesame Cupcake]*, 2012.
14. Lopez-Alarcon C. A., Cerdan-Leal M. A., Beristain C. I., Pascual-Pineda L. A. The potential use of modified quinoa protein isolates in cupcakes: physicochemical properties, structure and stability of cupcakes. *Food & Function*, 2019, Vol. 10 (7), pp. 4432–4439, doi:10.1039/C9FO00852G.
15. Romanchenko N. M., Ryndin A. V., Pavliuchenko O. S. Dotsilnist vykorystannia solodu zhytnoho fermentovanoho v tekhnologii keksiv [The expediency of using fermented rye malt in the technology of cupcakes]. *Food Industry*, 2019, no. 25, pp. 39–45, doi:10.24263/2225-2916-2019-25-7.
16. Zolotareva A. M., Rinchinova S. B., Njamdorzh B. Pat. 2547471, Ukraine. *Keks "ROSTIK" [Capcake "ROSTIK"]*, 2015.
17. Lebesi D. M., Tzia C. Effect of the Addition of Different Dietary Fiber and Edible Cereal Bran Sources on the Baking and Sensory Characteristics of Cupcakes. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, Vol. 4, pp. 710–722, doi:10.1007/s11947-009-0181-3.
18. Stetsenko N. O., Vink A. V. Analiz kharchovoi ta biolohichnoi tsinnosti keksiv, zbahachenykh ekstraktom stevii ta shrotom nasinnia lonu [Analysis of nutritional and biological value of cakes enriched with stevia extract and flaxseed meal]. *Ozdorovchi kharchovi produkty ta diietychni dobavky: tekhnologii, yakist ta bezpeka: materialy Mizhnar. Nauk.-prakt. konf., May 2–29, 2015*, Kyiv: NUKhT, 2015, pp. 123–124.
19. Abdel-Moemin A. R. Effect of Roselle calyces extract on the chemical and sensory properties of functional cupcakes. *Food Science and Human Wellness*, 2016, Vol. 5 (4), pp. 230–237, doi: 10.1016/j.fshw.2016.07.003.
20. Caleja C., Barros L., Barreira J. C. M., Ciric A., Sokovic M. Suitability of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) extract rich in rosmarinic acid as a potential enhancer of functional properties in cupcakes. *Food Chemistry*, 2018, Vol. 250, pp. 67–74, doi: 10.1016/j.foodchem.2018.01.034.
21. Sharan L. O., Bura H. M. Pat. 73942, Ukraine. *Keks, zbahachenyi burymy vodorostiamy ASCOPHYLLUM NODOSUM [Cupcake enriched with brown algae ASCOPHYLLUM NODOSUM]*, 2012.
22. Horobets O. M., Levchenko Yu. V., Borodai A. B., Choni I. V. Vykorystannia batatu v tekhnologii vyrobiv z keksovoho tista [The use of sweet potatoes in the technology of cake dough products.]. *Naukovyi visnyk LNUVMB imeni S.Z. Gzhytskoho. Serii: Kharchovi tekhnologii [Scientific Bulletin of LNUVMB named after S.Z. Gzhytskyi. Series: Food Technology]*, 2020, Vol. 22, no. 94, pp. 13–17, doi: 10.36477/2522-1221-2021-25-16.
23. Jabborova S. K., Isabaev I. B., Djuraeva N.R., Kurbanov M. T., Khaydar-Zade I. N., Rakhmonov K. S. Application of products of processing mulberries and roots of sugar beet in the production of cupcakes. *Journal of Critical Reviews*, 2020, Vol. 7(9), pp. 277–286, doi: 10.31838/jcr.07.09.61.
24. Lysiuk H. M., Samokhvalova O. V., Kucheruk Z. I. et al. *Tekhnolohiia boroshnianykh kondyterskykh i khlbibulochnykh vyrobiv: navch. posibnyk [Technology of flour confectionery and bakery products: textbook]*. Kharkiv: KhDUKhT, 2008, pp. 412–415.
25. Rusu I.-E., Marc R.A., Muresan C. C., Muresan E., Filip M. R., Onica B.-M., Csaba K. B., Alexa E. Advanced Characterization of Hemp Flour (*Cannabis sativa* L.) from Dacia Secuieni and Zenit Varieties, Compared to Wheat Flour. *Plants*, 2021, Vol. 10 (6), pp. 1237–1249, doi:10.3390/plants10061237.
26. Yevlash V. V., Hazzavi-Rohozina L. V., Sienohonova L. I. Udskonalennia tekhnologii pechyva pishchnoho z vykorystanniam llianoho boroshna [Improving the technology of shortbread cookies using flax flour]. *Advanced techniques and technologies of food production, restaurant business and trade*, 2021, no. 1 (33), pp. 187–198, doi: 10.5281/zenodo.5043572.
27. Yevchuk Ya. V., Kononenko L. M., Voitovska V. I., Tretiakova S. O. Aminokyslotnyi sklad nezhezhyrenoho boroshna kunzhutnoho ta perspektyvy yoho vykorystannia u vyrobnytstvi orhanichnykh produktiv spetsialnoho pryznachennia [Amino acid composition of non-fat sesame flour and prospects of its use in the production of special purpose organic products]. *Agrobiology*, 2021, no. 1 (163), pp. 41–48, doi: 10.33245/2310-9270-2021-163-1-41-48.
28. Saeleaw M., Schleining G. Composition, Physicochemical and Morphological Characterization of Pumpkin Flour. *Food process engineering in a changing world: 11th International Congress on Engineering and Food*, April 10–13. Athens, 2011, pp. 1–5.
29. Jamieson J. A., Viana L., English M. M. Folate Content and Chemical Composition of Commercially Available Gluten-Free Flour Alternatives. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2020, Vol. 75, pp. 337–343, doi:10.1007/s11130-020-00833-z.

Відомості про авторів (About the authors)

Сова Наталія Анатоліївна – кандидат технічних наук, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, доцент кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції; м. Дніпро, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4750-2473>; e-mail: sova.n.a@dsau.dp.ua

Sova Nataliia – Candidate of Technical Science (Ph. D.), Dnipro State Agrarian and Economic University, Associate Professor of Department of storage and processing technology of agricultural products; Dnipro, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4750-2473>; e-mail: sova.n.a@dsau.dp.ua

Худайбердієва Крістіна Анатоліївна – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, асистент кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції; м. Дніпро, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0800-6071>; e-mail: summer90821@gmail.com

Khudaiberdieva Kristina – Dnipro State Agrarian and Economic University, Assistant of Department of storage and processing technology of agricultural products; Dnipro, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0800-6071>; e-mail: summer90821@gmail.com

Коваленко Наталія Валеріївна – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, магістр спеціальності «Харчові технології»; м. Дніпро, Україна; e-mail: natalikovalenko262@gmail.com.

Kovalenko Nataliia – Dnipro State Agrarian and Economic University, Master of Science in Food Technology; Dnipro, Ukraine; e-mail: natalikovalenko262@gmail.com.

Михненко Ілона Романівна – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, магістр спеціальності «Харчові технології»; м. Дніпро, Україна; e-mail: mihnenko.ilona@gmail.com.

Mykhnenko Ilona – Dnipro State Agrarian and Economic University, Master of Science in Food Technology; Dnipro, Ukraine; e-mail: mihnenko.ilona@gmail.com

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Сова Н. А., Худайбердієва К. А., Коваленко Н. В., Михненко І. Р. Використання борошна із насіння нішевих культур у технології виробництва кексів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 94-100. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.13.

Please cite this article as:

Sova N., Khudaiberdiieva K., Kovalenko N., Mykhnenko I. The usage of niche seeds flour in cupcake production technology. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4 (10), pp. 94-100, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.13.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Сова Н. А., Худайбердієва К. А., Коваленко Н. В., Михненко І. Р. Использование муки из семян нишевых культур в технологии производства кексов. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 94-100. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.13.

АННОТАЦІЯ Мучные кондитерские изделия занимают ведущее место и пользуются значительным спросом в питании населения нашей страны и в мире. Существенным недостатком этой группы продуктов является низкое содержание жизненно необходимых эссенциальных веществ, таких как витамины, минеральные вещества, пищевые волокна и т.д., и в которых высокое содержание углеводов и липидов. Спрос на эти изделия обуславливает необходимость коррекции химического состава данных пищевых продуктов. Одним из самых известных представителей мучных кондитерских изделий являются кексы. В рецептурах кексов наибольшая доля приходится на такие виды рафинированного сырья, как пшеничная мука, сахар-песок, жиры, обуславливающие несбалансированность их химического состава, низкую питательную (пищевую) ценность и высокую калорийность. В качестве биологически активных добавок растительного происхождения к рецептуре кексов можно добавлять муку из семян различных нишевых культур (льна, конопли, кунжута, амаранта и т.п.). Ведь данный вид сырья ценен своим составом (содержанием белков, жиров, незаменимых аминокислот и жирных кислот, витаминов, минеральных веществ и т.п.) и оздоровительными свойствами. Цель исследования – разработка рецептуры кексов, обогащенных мукой из семян нишевых культур. Прототипом для исследования выбрана рецептура кекса «Столичный». В качестве сырья выбрана конопляная, льняная, тыквенная и кунжутная мука. Определены органолептические, физико-химические показатели качества, питательная и энергетическая ценность готовых изделий. По результатам органолептической оценки образцов кексов, определения их физико-химических показателей качества, сравнения с производственным образцом, нами рекомендовано к внедрению кекс, обогащенный обезжиренной конопляной мукой. Содержание белков в данном образце составляло 8,85 г/100 г, жиров – 17,83 г/100 г, углеводов – 51,8 г/100 г, энергетическая ценность – 396,85 кКал/100 г продукта. Благодаря функциональным свойствам конопляной муки, полученный продукт можно отнести к продуктам оздоровительного назначения.

Ключевые слова: кексы; конопляная мука; льняная мука; кунжутная мука; тыквенная мука

Надійшла (received) 17.11.2021

УДК 006.065:677

doi:10.20998/2413-4295.2021.04.14

СТАНДАРТИЗАЦІЯ РЕЖИМІВ СТЕРИЛІЗАЦІЇ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ ПАНДЕМІЇ (COVID-19) МЕТОДОМ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

О. М. ЧЕРНЯК, Н. А. СОРОКОЛАТ, І. В. КАНИЦЬКА, І. О. БАГАЄВ, Л. Ю. ФАТЄЄВА

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

АНОТАЦІЯ Представлено методи стерилізації текстильних матеріалів в умовах пандемії (COVID-19) та недоліки цих методів. Розглянуто ряд сучасних наукових робіт, пов'язаних зі стерилізацією текстильних матеріалів в умовах пандемії, які направлені на розробку технології стерилізації захисних медичних масок та медичних костюмів радіаційними методами із застосуванням гамма-випромінювання. В результаті проведеного аналізу було виявлено, що застосування гамма-випромінювання – це дуже небезпечний технологічний процес, так як застосовуються природні джерела - гамма-промені, радіаційні технології з гамма-випромінюванням складні при утилізації відпрацьованих джерел енергії та непрості при обслуговуванні. Для стерилізації текстильних матеріалів пропонується метод іонізуючого випромінювання. Сутність методу полягає в тому, що текстильний матеріал піддається стерилізації прискореними електронами. Визначено доцільність проведення теоретичних та експериментальних досліджень. Встановлено, що основний критерій стерилізації текстильних матеріалів є поглинута доза. Поглинута доза визначається експериментальним шляхом, але така процедура витратна за часом та ресурсами і не завжди є можливість її проведення. Тому для розрахунку поглинутої дози пропонується застосовувати математичну формулу поглиненої дози медичних текстильних матеріалів в залежності від частоти проходження імпульсів пучка прискорених електронів, швидкості конвеєра і геометричних параметрів текстильних матеріалів, ця математична формула дозволить знайти оптимальні технологічні режими процесу стерилізації. За допомогою математичної моделі поглинутої дози випромінювання матеріалом, при запропонованій технології з урахуванням властивостей матеріалів, можна розрахувати режими опромінення різних текстильних матеріалів, які відрізняються розміром, формою і фізичними властивостями, що дозволить розробити систему нормативних режимів технології радіаційно-фізичної стерилізації та забезпечити законодавчі та нормативні вимоги гігієни в умовах пандемії.

Ключові слова: медичний текстильний матеріал; стерилізація; метод іонізуючого випромінювання; стандартизація режимів; COVID-19

STANDARDIZATION OF STERILIZATION REGIMES FOR TEXTILE MATERIALS UNDER PANDEMIC CONDITIONS (COVID-19) BY THE METHOD OF IONIZING RADIATION

O. CHERNIAK, N. SOROCOLAT, I. KANYTSKA, I. BAHAIIEV, L. FATIEIEVA

Department of automation, metrology and energy efficient technologies, UEPA, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Methods for sterilizing textile materials in a pandemic (COVID-19) and the disadvantages of these methods are presented. A number of modern scientific works related to the sterilization of textile materials in a pandemic are considered, aimed at developing a technology for sterilizing protective medical masks and medical suits by radiation methods using gamma radiation. As a result of the analysis, it was found that the use of gamma radiation is a very dangerous technological process since natural sources are used - gamma rays, radiation technologies with gamma radiation are difficult when disposing of spent energy sources and are not easy to maintain. For sterilization of textile materials, the method of ionizing radiation is proposed. The essence of the method is that the textile material is sterilized by accelerated electrons. The expediency of carrying out theoretical and experimental research has been determined. It was found that the main criterion for sterilization of textile materials is the absorbed dose. The absorbed dose is determined experimentally, but such a procedure is time-consuming and resource-intensive, and it is not always possible to carry it out. Therefore, to calculate the absorbed dose, it is proposed to apply the mathematical formula of the absorbed dose of medical textile materials, depending on the frequency of passage of pulses of the accelerated electron beam, conveyor speed and geometric parameters of textile materials, the mathematical formula will allow finding the optimal technological modes of the sterilization process. Using the mathematical model of the absorbed dose of radiation by the material with the proposed technology, taking into account the properties of materials, it is possible to calculate the modes of irradiation of various textile materials that differ in size, shape, and physical properties, which will make it possible to develop a system of normative modes for the technology of radiation-physical sterilization and to ensure the legislative and regulatory requirements of hygiene in conditions of a pandemic.

Keywords: medical textile material; sterilization; method of ionizing radiation; standardization of modes; COVID-19

Вступ

При пандемії небезпечних вірусів, до яких відноситься COVID-19 виникає ряд проблем, пов'язаних з протоколами боротьби та зменшення їх

розповсюдження. До таких проблем відноситься технологія стерилізації заражених медичних приміщень, обладнання та матеріали. Існують такі матеріали, стерилізацію до яких важко або неможливо застосувати традиційні методи дезінфекції та

стерилізації (механічні, хімічні, температурні), особливо у великих обсягах. До таких матеріалів в медицині відносяться текстильні матеріали, такі як засоби індивідуального захисту, постільні речі (подушки, матраци, ковдри). Для стерилізації текстильних матеріалів від небезпечних бактерій та вірусів в умовах пандемії (COVID-19) пропонується технологія застосування методу іонізуючого випромінювання. Сутність методу полягає у наступному: спеціальне обладнання (прискорювач електронів) генерує та прискорює електрони, які пронизують матеріал, при цьому іонізують віруси та знешкоджують їх. Такий метод стерилізації високотехнологічний, енергоефективний і безпечний для людей і довкілля. Технологія передбачає вибір технологічного обладнання (прискорювача електронів), обладнання для транспортування в зону іонізуючого випромінювання та оптимальні режими іонізуючого випромінювання (інтенсивність, потужність, час).

Для розроблення технологічного процесу стерилізації текстильних матеріалів в умовах пандемії COVID-19 необхідно провести ряд наукових досліджень, а саме розробити математичну модель повної стерилізації в залежності від впливових чинників та визначити оптимальні режими технологічного процесу стерилізації в залежності від текстильного матеріалу, обладнання та об'єму матеріалів. Зважаючи на те, що технологія стерилізації методом іонізуючого випромінювання нова та мало вивчена в частині застосування в побутових умовах, то необхідно уніфікувати технологічний процес та визначити оптимальні технологічні режими обробки. Для ефективного та безпечного застосування такої технології необхідно розробити нормативний документ, який би регламентував технологічні режими процесу стерилізації текстильних матеріалів, в залежності від ряду чинників.

Мета роботи

Отримати нормативні режими технологічного процесу дезінфекції медичних текстильних матеріалів в умовах пандемії (COVID-19).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

За останні два роки, в період пандемії (COVID-19), людство знаходить технології та можливості боротьби з епідемією. В науковій літературі є ряд публікацій, пов'язаних з технологіями стерилізації в умовах пандемії, тобто в умовах, коли заражених об'єктів багато. В таких умовах технологічні процеси стерилізації не ефективні, тому розглядаються можливості розробки більш ефективних технологій, повторного використання та утилізації небезпечних текстильних матеріалів. В [1] розглядаються та порівнюються різні технології стерилізації засобів

індивідуального захисту (ЗІЗ), при цьому запропоновано їх аналіз та визначено переваги та недоліки, в залежності від матеріалу та обсягів стерилізації.

Один з найбільш розповсюджених методів стерилізації – хімічний метод, суть якого в обробці поверхонь хімічними речовинами. Основні хімічні речовини, які застосовують для стерилізації у медичній практиці це перекис водню, формальдегід та глутаральдегід. Фізична сутність впливу цих речовин на віруси представлено в [2,3]. Недоліки методу стерилізації у тому, що пари вказаних хімічних речовин негативно впливають на здоров'я людей та викликають респіраторні захворювання та алергію, характерні різкими запахами. Крім того, ці речовини не застосовуються для целюлози [4].

В роботі [5] представлені дослідження, пов'язані з технологіями стерилізації ЗІЗ методами високих температур, а саме, зміни стабільності вірусів при різних температурах. Дослідження показали, що вірус має найбільшу стабільність при температурі 4 °С. При температурі 70 °С вірус був дезактивований за 5 хвилин. Таким чином залежність активації вірусу від температури дозволяє пропонувати технології стерилізації ЗІЗ. Але такі технології мають недоліки, основним з яких те, що не всі матеріали витримують високі температури та втрачають свої фізико-хімічні характеристики. А застосування гарячого пару потребує застосування технології сушки.

У статтях [6-8] вивчають застосування ультрафіолетових (УФ) променів з метою дезінфекції приміщень, обладнання та постільних речей. Ефективність застосування УФ променів для стерилізації залежить від довжини хвилі і відомо, що найбільша ефективність досягається при довжині хвилі 260 нм. Недоліком такого методу стерилізації те, що він ефективний тільки на поверхні матеріалів і промені ультрафіолету не потрапляють в середину матеріалу. Крім того УФ промені шкідливі для здоров'я людей, тому мають обмеження при застосуванні.

У роботі [9] аналізують технологію застосування високоенергетичних рентгенівських променів гамма-променів. Досліджено, що саме гамма-промені на 90 % руйнують ДНК клітин, тому можуть бути застосовані для руйнування вірусів. Перевагами такого методу стерилізації є те, що гамма-промені проникають в середину матеріалу. Їх проникливість залежить від його об'єму та щільності. Головним завданням при застосування гамма-променів для стерилізації являється оптимальні режими опромінення. Недоліком такого методу є підвищені вимоги до безпеки для здоров'я людей.

Проведені дослідження стерилізації ЗІЗ після їх виробництва дозволяють зробити висновок про можливість їх повторної стерилізації після застосування [10,11]. Доказано, що прості хірургічні лицьові маски витримують опромінення електронним пучком променів до 25 кГр без зміни їх фізико-

хімічних характеристик. В роботі [12] дослідженнями доказано, що застосування гамма-променів погіршило ефективність фільтрації масок, тому про можливість застосування такої технології є запитання. В роботах [13-16] підтверджують недоліки застосування гамма-променів для стерилізації медичних масок через погіршення їх функціональних характеристик. Ряд публікацій, пов'язані з дослідженнями радіаційної обробки спеціального одягу, серед яких [17-21].

Публікації, які пов'язані зі стерилізацією текстильних матеріалів в умовах пандемії (COVID-19), направлені на розробку технології стерилізації захисних медичних масок та медичних костюмів радіаційними методами із застосуванням гамма випромінювання. Застосування гамма випромінювання дуже небезпечний технологічний процес, так як застосовується природні джерела гамма променів. Радіаційні технології з гамма випромінювання складні в обслуговуванні та утилізації відпрацьованих джерел енергії.

Для досягнення мети пропонується розрахувати режими процесу обробки текстильних матеріалів методом іонізуючого випромінювання в залежності від виду текстильних матеріалів та їх об'ємів, а також отримати нормативні режими технології стерилізації у вигляді залежностей поглинутої дози для різних текстильних матеріалів.

Викладення основного матеріалу

Існуючі промислові радіаційні технології являють собою процеси обробки різних виробів і матеріалів з спрямованим впливом іонізуючого випромінювання, які призводять до корисної зміни їх фізичних, хімічних або біологічних характеристик, а також зменшують вплив виробництва на довкілля. Пучки прискорених електронів, гальмівне випромінювання, що генерується пучками електронів, і гамма-випромінювання від радіонуклідів є основними джерелами іонізуючого випромінювання, яке використовується в промислових радіаційних технологіях. Вибір джерела випромінювання зазвичай залежить від практичних вимог процесу опромінення, таких як величина поглиненої дози, неоднорідність поглиненої дози, товщина оброблюваного матеріалу, щільність і конфігурація виробів, продуктивність процесу обробки, капітальні та експлуатаційні витрати.

Для стерилізації текстильних матеріалів пропонується застосовувати електронні прискорювачі. Вони широко застосовуються для радіаційного модифікування матеріалів, радіаційної полімеризації, стерилізації медичних виробів, обробки харчових продуктів, в радіаційно-фізичних технологіях, а також в екології для очищення стічних вод, викидних газів і обробки твердих відходів.

Для проведення наукових досліджень, а саме розробки технології стерилізації текстильних матеріалів у великих кількостях (в умовах пандемії)

необхідно провести ряд теоретичних та експериментальних досліджень. Теоретичні дослідження будуть направлені на розроблення математичної моделі поглинутої дози випромінювання матеріалом при запропонованій технології з урахуванням властивостей матеріалів. Експериментальні дослідження стосуватимуться проведення ряду експериментів з метою оптимізації режимів обробки в залежності від щільності матеріалу та його об'єму.

Для визначення режимів технологічного процесу стерилізації текстильних матеріалів визначимо геометричні та фізичні характеристики матеріалу. Пропонується обробляти матеріал – ватин, який погружено на конвеєр, що рухається з постійною швидкістю. Будемо вважати, що ширина та висота шару матеріалу має геометричні розміри 50x50 см. Такі геометричні характеристики пов'язані з характеристиками прискорювача. В якості прискорювача пропонується використовувати стандартну технологічну установку ЛУ-10, яка включає прискорювач електронів з системою сканування пучка. На ділянці радіаційної обробки рухається конвеєр для транспортування зразків в зону опромінення. Текстильний матеріал, який спрямовується на радіаційну стерилізацію, пакується в картонну тару, розмір і маса яких попередньо погоджуються для забезпечення необхідного режиму обробки. Опромінення здійснюється з двох сторін. Технологічна установка ЛУ-10 має такі характеристики випромінювання:

- Електронне випромінювання:
 - енергія електронів – 8...18 MeV;
 - номінальне значення енергії електронів - 10 MeV;
 - тривалість імпульсу – 3,5 мкс;
 - частота проходження імпульсів пучка – 12,5...300 Гц;
 - струм пучка (середнє значення) - до 1000 мкА;
 - частота сканування пучка – 3 Гц;
 - геометричні розміри пучка (на випускному вікні) – 2×30 см;
 - нерівномірність лінійної щільності потоку електронів - ± 3%;
 - потужність поглиненої дози електронного випромінювання – до $1 \cdot 10^3$ Гр/с.
- Гальмівне випромінювання:
 - потік енергії (потужність) гальмівного випромінювання (ГВ), кВт – до 1,6;
 - геометричні розміри потоку ГВ (на конвертері) – 3×35 см;
 - потужність поглиненої дози ГВ – до 1,0 Гр/с.

Одним з основних критеріїв радіаційної обробки є поглинена доза. Доза в будь-якій точці тари залежить від енергії електронів, середнього струму, ширини розгортки, швидкості конвеєра, товщини і щільності об'єкта, а також самого матеріалу, який знаходиться між вікном виведення пучка, і цією точкою. На дозу також може впливати наявність

неоднорідностей в матеріалі який стерилізується, внаслідок розсіювання електронів.

Технологічна установка працює з такими режимами:

- частота проходження імпульсів пучка – 100 Гц;
- частота сканування пучка – 3 Гц;
- потужність пучка – 10 кВт;
- енергія – 10 МеВ;

- струм пучка складе - 1 мА, що відповідає $N_0 = 6,24 \cdot 10^{15}$ електронів в імпульсі;

- відстань між випускним вікном і об'єктом, що опромінюється – близько 1 м;

- матеріал - целюлоза, так як ватин складається з целюлози на 99,5%;

- щільність матеріалу – 1,5 г/см³.

На ділянці радіаційної обробки використовуються два типи дозиметрів: Harwell RedPerspex 4034 і дозиметрична плівка RISO В-3. Дозиметр Harwell RedPerspex 4034 виготовлений з добавкою радіаційно чутливого барвника у вигляді пластинок розміром 30x11 мм і товщиною 3 ± 0.4 мм. Діапазон вимірювання дози становить 5-50 кГр, похибка $\pm 5\%$. Для цього визначається оптична густина дозиметра на довжині хвилі 640 нм.

Одним з основних критеріїв радіаційної обробки є поглинена доза. Доза в будь-якій точці тари з текстильним матеріалом залежить від енергії електронів, середнього струму, ширини розгортки, швидкості конвеєра, товщини і щільності об'єкта, а також самого матеріалу, який знаходиться між вікном виведення пучка, і цією точкою. На дозу також може впливати наявність неоднорідностей в оброблюваному матеріалі внаслідок розсіювання електронів.

Як відомо, формула поглиненої дози рухомого об'єкта, що опромінюється має наступний вигляд:

$$D_c = 1,6 \cdot 10^{-13} N_0 \frac{e^{-\mu x}}{v \cdot t \cdot l} \cdot \frac{S_{col}}{\rho} \quad (1)$$

Так як щільність повітря вкрай мала в порівнянні з опромінюваним об'єктом і становить 0,00129 г/см³, для шару повітря в 1 м величина в розмірності осі ординат дорівнюватиме 0,129 г/см² величину у формулі 1 приймемо рівної 0,9 [22]. А для заданої енергії 10 МеВ гальмівна здатність целюлози дорівнює 1,859 МеВ см²/г.

Беручи до уваги перераховані вище параметри можна розрахувати порядок обчислення параметрів, що залишилися у формулі (1), а саме. За одну секунду пучок сканується три рази при цьому випускається 100 імпульсів пучків електронів і за цей час конвеєр проходить v сантиметрів. Площа пучка становить 0,7854 см². За 1 секунду загальна довжина опроміненого виробу складе 300 см. Приймемо швидкість конвеєра дорівнює 1 см/с. За 1 с прискорювач зробить 100 імпульсів електронів і беручи до уваги, що діаметр пучка - 1 см і ширина поверхні, що обробляється - 50 см, то на кожен сантиметр доведеться по 2 імпульсу, таким чином N_0

у формулі (1) подвоюється. Узагальнюючи вищевикладені викладки формула (1) набуває такого вигляду з урахуванням частоти проходження імпульсів пучка, швидкості конвеєра і довжини об'єкта, який стерилізується (крайовими ефектами нехтуємо і припускаємо, що обробляється об'єкт не довше ширини конвеєра):

$$D_c = 1,6 \cdot 10^{-13} \eta \cdot N_0 \frac{v \cdot d}{v \cdot l} \cdot \frac{S_{col}}{\rho} \quad (2)$$

де η - коефіцієнт ослаблення при проходженні пучка прискорених електронів; N_0 - кількість електронів в імпульсі; v - частота проходження імпульсів пучка, Гц; d - діаметр пучка, см; v - швидкість конвеєра, см/с; l - ширина об'єкта, що оброблюється, см; $\frac{S_{col}}{\rho}$ - гальмівна здатність речовини, МеВ·см²/г.

Отже, застосовуючи формулу (2), можна змінювати швидкість та геометричні параметри тари з текстильним матеріалом і отримувати величину поглиненої дози. Або можна вирішувати обернену задачу, а саме, знаючи величину поглиненої дози можна визначити швидкість конвеєра або визначити оптимальну ширину тари. Використовуючи формулу (2) можна отримати стандартизовані режими стерилізації текстильних матеріалів методом іонізуючого випромінювання. Тобто можна розробити систему нормативних режимів, які будуть сприяти створенню стандарту для застосування даної технології до процесу стерилізації медичних текстильних матеріалів в умовах пандемії (COVID-19), або в умовах масового виробництва.

На рис. 1 представлений графік залежності поглиненої дози текстильного матеріалу від частоти проходження імпульсів пучка для швидкості конвеєра 0,5 см/с.

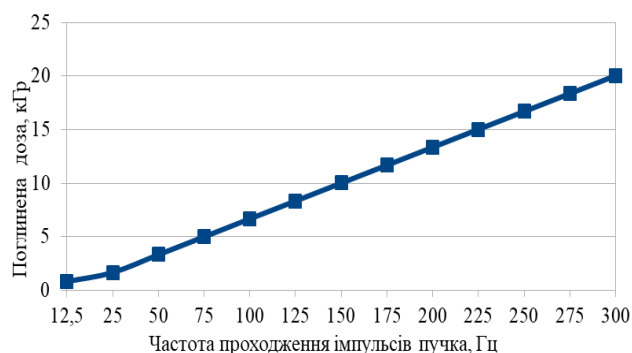


Рис. 1. Залежність поглиненої дози текстильного матеріалу від частоти проходження імпульсів пучка для швидкості конвеєра 0,5 см/с

Отже, використовуючи формулу (2) можна розрахувати режими опромінювання різних текстильних матеріалів, які відрізняються розміром, формою і

фізичними властивостями, що дозволить розробити систему нормативних режимів технології радіаційно-фізичної дезінфекції та забезпечити законодавчі та нормативні вимоги гігієни в умовах пандемії.

Висновки

Отримана формула поглиненої дози медичних текстильних матеріалів в залежності від частоти проходження імпульсів пучка прискорених електронів, швидкості конвеєра і геометричних параметрів об'єкта дозволить знайти оптимальні технологічні режими процесу стерилізації.

Експериментальні дослідження дозволять визначити оптимальну частоту проходження імпульсів пучка електронів, швидкості конвеєра, в залежності від щільності матеріалів та їх об'ємів, при яких всі шкідливі бактерії та віруси знищуються.

Окрім результатів, отриманих за допомогою проведення експериментальних досліджень для стерилізації текстильних матеріалів можуть бути отримані додаткові корисні результати, такі як вплив заряджених електронів на фізико-хімічні властивості різних матеріалів. Такі результати можуть бути корисними для інших технологій з застосуванням методу іонізуючого випромінювання.

Список літератури

1. Jinia J. et al. Review of Sterilization Techniques for Medical and Personal Protective Equipment Contaminated With SARS-CoV-2. *IEEE Access* 8. 2020. № 8. P. 111347-111354. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3002886.
2. Fadaei A. Viral Inactivation with Emphasis on SARS-CoV-2 Using Physical and Chemical Disinfectants. *Scientific World Journal*. 2021. Oct 25. P. 1-6. doi: 10.1155/2021/9342748.
3. Centers for Disease Control and Prevention. Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities. 2019. P. 55-56. URL: <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/pdf/guidelines/disinfection-guidelines-H.pdf>. (дата звернення: 29.11.2021).
4. Rutala W. A., Weber D. J. Disinfection and sterilization: An overview. *American Journal of Infection Control*. 2013. № 41 (5). P. S2-S5. doi: 10.1016/j.ajic.2012.11.005.
5. Chin A. J. et al. Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions. *Lancet Microbe*. 2020. № 1(1). P. e10. doi: 10.1016/S2666-5247(20)30003-3.
6. Rastogi R. P., Richa, Kumar A., Tyagi M. B., Sinha R. P. Molecular mechanisms of ultraviolet radiation-induced DNA damage and repair. *Journal of Nucleic Acids*. 2010. № 2010. P. 1-32. doi: 10.4061/2010/592980.
7. Anderson J. G., Rowan N. J., MacGregor S. J., Fouracre R. A., Farish O. Inactivation of food-borne enteropathogenic bacteria and spoilage fungi using pulsed-light. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2000. № 28 (1). P. 83-88. doi: 10.1109/27.842870.
8. Radiation: Ultraviolet (UV) radiation. *World Health Organization*. 2016. URL: <https://www.who.int/uv/faq/what-is-uv/en/index2.html> (дата звернення 29.11.2021).
9. Radiation Effective in Sterilizing Personal Protective Equipment Except For Respiratory Masks—IAEA. Accessed. *IAEA*. 2020. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/radiationeffective-in-sterilizing-personal-protective-equipment-except-for-respiratory-masks-iaea> (дата звернення: 29.11.2021).
10. Flakiewicz P. et al. Effects of electron-beam irradiation on the structure and selected properties of melt-blown polypropylene unwoven fabric used in simple, surgical-type protective face masks. *IAEA Technical Report. Sterilization and reprocessing of personal protective equipment (PPE), including respiratory masks, by ionizing radiation*. 2020. P. 79-187.
11. Yun J. M. et al. A report for sterilizing personal protective equipment by ionizing radiation. *IAEA Technical Report. Sterilization and reprocessing of personal protective equipment (PPE), including respiratory masks, by ionizing radiation*. 2020. P. 72-78.
12. Gouzman I. et al. The feasibility of sterilization for reuse of disposable medical equipment: Gamma irradiation of medical masks and medical protective clothing. *IAEA Technical Report. Sterilization and reprocessing of personal protective equipment (PPE), including respiratory masks, by ionizing radiation*. 2020. P. 48-71.
13. Cortella L. et al. Feasibility of gamma or e-beam irradiation as a Treatment for reuse of medical masks after a first use. *IAEA Technical Report. Sterilization and reprocessing of personal protective equipment (PPE), including respiratory masks, by ionizing radiation*. 2020. P. 29-47.
14. Vasquez P. A. S. et al. Development of methodologies for decontamination, reuse and improvement of the Properties of respiratory protective equipment using ionizing radiation - preliminary results. *IAEA Technical Report. Sterilization and reprocessing of personal protective equipment (PPE), including respiratory masks, by ionizing radiation*. 2020. P. 17-28.
15. Рябухин О. В., Фадеева А. С. Радиационная обработка изделий культурного наследия. *Наука. Информатизация. Технологии. Образование. Материалы XIII Международной научно-практической конференции*. 2020. С. 682-689.
16. Брязгин А. А. и др. Стерилизация медицинских изделий на ускорителях серии ИЛУ. *Медицинская физика*. 2017. С. 57-60.
17. Моргунов В. В., Диденко Н. В., Трищ Р. М. Выбор и использование математических методов для определения технологических параметров радиационно - защитных материалов. *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. 2016. №12 (1184). С. 56-61. doi:10.20998/2413-4295.2016.12.08.
18. Моргунов В.В., Диденко Н.В., Трищ Р.М. Метод расчета поглощенной (эквивалентной) дозы и мощности поглощенной (эквивалентной) дозы ионизирующего излучения. *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. 2016. №18 (1190). С. 101-106. doi:10.20998/2413-4295.2016.18.15.
19. Моргунов В. В., Диденко Н. В., Трищ Р. М. Численный расчет эффективности радиационной защитной одежды при помощи метода Монте - Карло. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2016. № 25 (1197). С. 119-124. doi:10.20998/2413-4295.2016.25.18.
20. Черняк О. М., Трищ Р. М., Моргунов В. В. Методика розрахунку поглинутої дози рухомого об'єкта, що опромінюється прискореними електронами. *Машинобудування. Збірник наукових праць*. 2018. № 22. С. 142-147. doi:10.32820/2079-1747-2018-22-142-147.

21. Черняк Е. Н., Моргунов В. В., Трищ Р. М.. Применение метода Монте-Карло для определения технологических параметров радиационной обработки ускоренными электронами. *Машинобудування. Збірник наукових праць*. 2017. № 20. С. 162-168.
22. Медведев В. П., Очкин А. В., Семенов М. А. *Физические основы радиохимии*. Москва: Издательство НИЯУ МИФИ, 2011. 195 с.

References (transliterated)

1. Jinia J. et al. Review of Sterilization Techniques for Medical and Personal Protective Equipment Contaminated With SARS-CoV-2. *IEEE Access* 8, 2020, Vol. 8, pp. 111347-111354, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3002886.
2. Fadaei A. Viral Inactivation with Emphasis on SARS-CoV-2 Using Physical and Chemical Disinfectants. *Scientific World Journal*, 2021, Oct 25, pp. 1-6, doi: 10.1155/2021/9342748.
3. Centers for Disease Control and Prevention. Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities, 2019, pp. 55-56. Available at: <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/pdf/guidelines/disinfection-guidelines-H.pdf>. (accessed 29.11.2021).
4. Rutala W. A., Weber D. J. Disinfection and sterilization: An overview. *American Journal of Infection Control*, 2013, 41 (5), pp. S2-S5, doi: 10.1016/j.ajic.2012.11.005.
5. Chin A. J. et al. Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions. *Lancet Microbe*, 2020, Vol. 1 no. 1, pp. e10, doi: 10.1016/S2666-5247(20)30003-3.
6. Rastogi R. P., Richa, Kumar A., Tyagi M. B., Sinha R. P. Molecular mechanisms of ultraviolet radiation-induced DNA damage and repair. *Journal of Nucleic Acids*, 2010, Vol. 2010, pp. 1-32, doi: 10.4061/2010/592980.
7. Anderson J. G., Rowan N. J., MacGregor S. J., Fouracre R. A., Farish O. Inactivation of food-borne enteropathogenic bacteria and spoilage fungi using pulsed-light. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, Vol. 28, no.1, pp. 83-88, doi: 10.1109/27.842870.
8. Radiation: Ultraviolet (UV) radiation. *World Health Organization*, 2016, Available at: <https://www.who.int/uv/faq/whatisuv/en/index2.html> (accessed 29.11.2021).
9. Radiation Effective in Sterilizing Personal Protective Equipment Except For Respiratory Masks—IAEA. Accessed. *IAEA*, 2020, Available at: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/radiationeffective-in-sterilizing-personal-protective-equipment-except-for-respiratory-masks-iaea> (accessed 29.11.2021).
10. Flakiewicz P. et al. Effects of electron-beam irradiation on the structure and selected properties of melt-blown polypropylene unwoven fabric used in simple, surgical-type protective face masks. *IAEA Technical Report. Sterilization and reprocessing of personal protective equipment (PPE), including respiratory masks, by ionizing radiation*, 2020, pp. 79-187.
11. Yun J. M. et al. A report for sterilizing personal protective equipment by ionizing radiation. *IAEA Technical Report. Sterilization and reprocessing of personal protective equipment (PPE), including respiratory masks, by ionizing radiation*, 2020, pp. 72-78.
12. Gouzman I. et al. The feasibility of sterilization for reuse of disposable medical equipment: Gamma irradiation of medical masks and medical protective clothing. *IAEA Technical Report. Sterilization and reprocessing of personal protective equipment (PPE), including respiratory masks, by ionizing radiation*, 2020, pp. 48-71.
13. Cortella L. et al. Feasibility of gamma or e-beam irradiation as a Treatment for reuse of medical masks after a first use. *IAEA Technical Report. Sterilization and reprocessing of personal protective equipment (PPE), including respiratory masks, by ionizing radiation*, 2020, pp. 29-47.
14. Vasquez P. A. S. et al. Development of methodologies for decontamination, reuse and improvement of the Properties of respiratory protective equipment using ionizing radiation - preliminary results. *IAEA Technical Report. Sterilization and reprocessing of personal protective equipment (PPE), including respiratory masks, by ionizing radiation*, 2020, pp. 17-28.
15. Riabukhin O., Fadeeva A. Radiatsionnaya obrabotka izdeliy kul'turnogo naslediya. [Radiation processing of culture heritage artifacts]. *The science. Informatization. Technologies. Education. Materials of the XIII International Scientific and Practical Conference*. 2020, pp. 682-689.
16. Bryazgin A. A. et al. Sterilizatsiya meditsinskikh izdeliy na uskoritelyakh serii ILU. [Sterilization of medical devices in accelerators of ILU series]. *Medical physics*, 2017, pp. 57-60.
17. Morgunov, V., Didenko, N., Trishch, R. Choice and use of mathematical methods to determine the technological parameters of radiation-shielding materials. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, 2016, Vol. 12 (1184), pp. 56-61, doi:10.20998/2413-4295.2016.12.08.
18. Morgunov V., Trishch R., Didenko N. Metod rascheta pogloshchennoy (ekvivalentnoy) dozy i moshchnosti pogloshchennoy (ekvivalentnoy) dozy ioniziruyushchego izlucheniya. [Calculation method of the absorbed (equivalent) dose and absorbed (equivalent) dose rate of the ionizing radiation]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. 2016, Vol. 18 (1190), pp. 101-106, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.15.
19. Mogunov V., Didenko N., Trishch R. Chislennyy raschet effektivnosti radiatsionnoy zashchitnoy odezhdy pri pomoshchi metoda Monte-Karlo. [Numerical calculation of radiation protective clothing efficiency by using Monte Carlo method]. *Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. 2016, Vol. 25 (1197), pp. 119-124, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.18.
20. Cherniak O., Trishch R., Mogunov V. Metodyka rozrakhunku pohlynutoi dozy rukhomoho obiekta, shcho oprominiuetsia pryskorennyimi elektronami. [Method of calculating the absorbed dose of a moving object irradiated by accelerated electrons]. *Engineering*, 2018, Vol. 22, pp. 142-147, doi: 10.32820/2079-1747-2018-22-142-147.
21. Cherniak E., Morgunov V., Trishch R. Primeneniye metoda Monte-Karlo dlya opredeleniya tekhnologicheskikh parametrov radiatsionnoy obrabotki uskorennyimi elektronami [Application of the Monte-Carlo method for definitions of technological parameters of radiation processing by accelerated electrons]. *Engineering*, 2017, Vol. 20, pp. 162-168.
22. Medvedev V., Oчкин А., Семенов М. *Fizicheskiye osnovy radiokhimii. [Physical foundations of radiochemistry]*. Moscow, Izdatelstvo NIYAU MIFI, 2011. 195 p.

Відомості про авторів (About authors)

Черняк Олена Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, старший викладач кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-6167-8809; e-mail: olena-cherniak@ukr.net.

Olena Cherniak – Candidate of Technical Sciences, Docent, Senior Lecturer, Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6167-8809; e-mail: olena-cherniak@ukr.net.

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

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

Каницька Ірина Вікторівна – Українська інженерно-педагогічна академія, аспірантка кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-7001-8340; e-mail: irinadovgopolaya@icloud.com.

Iryna Kanytska – graduate student Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-7001-8340; e-mail: irinadovgopolaya@icloud.com.

Багаєв Ігор Олександрович - Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-9101-5114; e-mail: i.a.bagayev@gmail.com.

Ihor Bahaiev - graduate student Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9101-5114; e-mail: i.a.bagayev@gmail.com.

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

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

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Черняк О. М., Сороколат Н. А., Каницька І. В., Багаєв І. О., Фатєєва Л. Ю. Стандартизація режимів стерилізації текстильних матеріалів в умовах пандемії (COVID-19) методом іонізуючого випромінювання. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 101-107. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.14.

Please cite this article as:

Cherniak O., Sorocolat N., Kanytska I., Bahaiev I., Fatieieva L. Standardization of sterilization regimes for textile materials under pandemic conditions (COVID-19) by the method of ionizing radiation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4 (10), pp. 101-107, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.14.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Черняк Е. Н., Сороколат Н. А., Каницькая И. В., Багаев И. А., Фатеева Л. Ю. Стандартизация режимов стерилизации текстильных материалов в условиях пандемии (COVID-19) методом ионизирующего излучения. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 101-107. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.14.

АННОТАЦІЯ Представлены методы стерилизации текстильных материалов в условиях пандемии (COVID-19) и недостатки этих методов. Рассмотрен ряд современных научных работ, связанных со стерилизацией текстильных материалов в условиях пандемии, направленных на разработку технологии стерилизации защитных медицинских масок и медицинских костюмов радиационными методами с применением гамма-излучения. В результате проведенного анализа было обнаружено, что применение гамма-излучения – это очень опасный технологический процесс, так как применяются природные источники – гамма-лучи, радиационные технологии с гамма-излучением сложны при утилизации отработанных источников энергии и непросты при обслуживании. Для стерилизации текстильных материалов предлагается метод ионизирующего излучения. Суцність метода состоит в том, что текстильный материал подвергается стерилизации ускоренными электронами. Определена целесообразность проведения теоретических и экспериментальных исследований. Установлено, что основным критерием стерилизации текстильных материалов является поглощенная доза. Поглощенная доза определяется экспериментальным путем, но такая процедура затратная по времени и ресурсам, и не всегда есть возможность ее проведения. Поэтому для расчета поглощенной дозы предлагается применить математическую формулу поглощенной дозы медицинских текстильных материалов в зависимости от частоты прохождения импульсов пучка ускоренных электронов, скорости конвейера и геометрических параметров текстильных материалов, математическая формула позволит найти оптимальные технологические режимы процесса стерилизации. С помощью математической модели поглощенной дозы излучения материалом при предложенной технологии с учетом свойств материалов можно рассчитать режимы облучения различных текстильных материалов, отличающиеся размером, формой и физическими свойствами, что позволит разработать систему нормативных режимов технологии радиационно-физической стерилизации и обеспечить законодательные и нормативные требования гигиены в условиях пандемии.

Ключевые слова: медицинский текстильный материал; стерилизация; метод ионизирующего излучения; стандартизация режимов; COVID-19

Надійшла (received) 08.11.2021

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

- Білик С. Ю., Божко Е. В.** Аналіз методів та способів діагностування двигунів внутрішнього згорання методами нерозбірного контролю 3
- Борисенко А. М., Єнікєєв О. Ф., Захаренков Д. Ю., Зиков І. С.** Аналізування частотних характеристик системи керування процесами подачі палива у циліндри силового агрегату 9
- Гаврилова Т. В., Чаплигін Є. О., Шиндерук С. О.** Застосування та схеми попереднього індукційного нагріву у магнітно-імпульсній обробці металів 17
- Дегтярьов І. М., Нешта А. О., Самардак М. П., Кононович В. М., Клок Я. В.** Аналіз геометричних параметрів та технічних вимог до штифтових конічних з'єднань у вузлах насосів 24
- Довгополов А. Ю., Некрасов С. С., Реута З. А.** Забезпечення продуктивності виготовлення паливних брикетів Pini-Kay за рахунок модернізації робочої частини пресу ПШ-250 36
- Крилов Д. С., Холод О. І.** Вдосконалення структури векторної системи керування активного керованого випрямляча 43
- Сергієнко М. Є., Калінін П. М., Гасанов М. І., Павлова Н. М., Свідло В. С., Окунь А. О.** Аналіз параметрів приводу зведеного зчеплення зі зменшеними енерговитратами на керування 49
- Степанець О. В., Маріяш Ю. І.** Модельно-прогнозуючий регулятор дуттєвого режиму киснево-конвертерного процесу 61
- Чулєєва О. В., Золотарьов В. М., Чулєєв В. Л., Кулєшова Т. А., Суслін М. С.** В'язкопружні властивості полімерної композиції, що не містить галогенів, для кабельної продукції 67

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

- Заковоротний О. Ю., Харченко А. О.** Властивості інтервальних нечітких множин типу-2 в системах підтримки прийняття рішень 75

ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Заморська І. Л., Рибчак О. С.** Втрати маси та товарна оцінка плодів груші впродовж зберігання залежно від способу пакування 82
- Івашура А. А., Борисенко О. М., Толмачова М. В.** Стала харчова поведінка 88
- Сова Н. А., Худайбердієва К. А., Коваленко Н. В., Михненко І. Р.** Використання борошна із насіння нішевих культур у технології виробництва кексів 94
- Черняк О. М., Сороколат Н. А., Каницька І. В., Багасєв І. О., Фатєєва Л. Ю.** Стандартизація режимів стерилізації текстильних матеріалів в умовах пандемії (COVID-19) методом іонізуючого випромінювання 101

CONTENTS

ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

- Bilyk S., Bozhko E.** Analysis of methods and methods of diagnosing internal combustion engines by non-assembly control methods 3
- Borysenko A., Yenykiiyev O., Zakharenkov D., Zykov I.** Analysis of the frequency characteristics of the control system for the processes of fuel supply to the cylinders of the power unit 9
- Gavrylova T., Chaplygin E., Shinderuk S.** Application and schemes of induction preliminary heating in magnetic-pulse treatment of metals 17
- Dehtiarov I., Neshta A., Samardak N., Kononovych V., Klok Y.** Analysis of geometric parameters and technical requirements for pin conical joints in pump nodes 24
- Dovhopolov A., Nekrasov S., Reuta Z.** Improving the productivity of Pini-Kay fuel briquettes by modernizing the working part of the PSH-250 press 36
- Krylov D., Kholod O.** Improving of the vector control system structure of the active controlled rectifier 43
- Sergienko N., Kalinin P., Gasanov M., Pavlova N., Svidlo V., Okun A.** Analysis of the parameters of the double clutch drive with reduced control energy consumption 49
- Stepanets O., Mariiash Y.** A model predictive controller of the blowing mode during basic oxygen furnace process 61
- Chulieieva O., Zolotaryov V., Chulieiev V., Kuleshova T., Suslin M.** The viscoelastic properties of a halogen-free polymer composition, for cable products 67

INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

- Zakovorotniy A., Kharchenko A.** Properties of interval type-2 fuzzy sets in decision support systems 75

CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY

- Zamorska I., Rybchak O.** Weight loss and commodity evaluation of pear fruits during storage depending on the packaging method 82
- Ivashura A., Borysenko O., Tolmachova M.** Sustainable eating behavior 88
- Sova N., Khudaiberdiyeva K., Kovalenko N., Mykhnenko I.** The usage of niche seeds flour in cupcake production technology 94
- Cherniak O., Sorocolat N., Kanytska I., Bahaiev I., Fatieieva L.** Standardization of sterilization regimes for textile materials under pandemic conditions (COVID-19) by the method of ionizing radiation 101

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ".
СЕРІЯ: НОВІ РІШЕННЯ В СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

Збірник наукових праць

№ 4(10)' 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.nsmt@gmail.com

Підп. до друку «30» грудня 2021 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 14,0. Облік.вид.арк. 8,3.
Тираж 50 прим. Зам. № 89. 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

