

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО



DMYTRO MOTORNYI TAVRIA STATE
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY



ПРАЦІ

Таврійського державного
агротехнологічного університету

Технічні науки

PROCEEDINGS OF TAVRIA STATE
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY

Technical sciences

*Виходить 3 рази на рік
Видається з 1998 р.*

Випуск 25, том 2
Issue 25, volume 2

WEB: <https://oj.tsatu.edu.ua>

DOI: 10.32782/2078-0877-2025-25-2



Видавничий дім
«Гельветика»
2025



УДК [631.3+621.3+004+663/664]

Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання. / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. – Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 2. 270 с.

ISSN 2078-0877

Представлені результати наукових досліджень вчених у галузях галузевого машинобудування, енергетики, електротехніки, електромеханіки, харчових технологій, комп'ютерних наук та інформаційних технологій.

Видання призначене для наукових працівників, викладачів, інженерно-технічного персоналу і здобувачів вищої освіти, які спеціалізуються у відповідних або суміжних галузях науки та напрямках виробництва.

Реферативні бази: Crossref, Google Scholar, «Україна наукова», НБУ ім. В. І. Вернадського

Головний редактор

Кюрчев В. М., чл.-кор. НААН України,
д-р техн. наук, проф. (Україна)

Editor in chief

Kyurchev V., corresponding member of NAAS of Ukraine,
Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

Заступники головного редактора

Надикто В. Т., чл.-кор. НААН України, д-р техн. наук,
проф. (Україна)
Панченко А. І., д-р техн. наук, проф. (Україна)

Deputy editors in chief

Nadykto V., corresponding member of NAAS of Ukraine,
Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Panchenko A., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

Відповідальний секретар

Волошина А. А., д-р техн. наук, проф. (Україна)

Executive secretary

Voloshina A., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

Технічний секретар

Погорельцева Д. О. (Україна)

Technical secretary

Pogoreltseva D. (Ukraine)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Белосев Христо, д-р техн. наук, проф. (Болгарія)
Даманаускас Відас, д-р техн. наук, проф. (Литва)
Івановс Семенс, д-р техн. наук (Латвія)
Ольт Юрі, PhD, д-р техн. наук, проф. (Естонія)
Паскуцці Сімоні, PhD, доц. (Італія)
Финдура Павол, PhD, проф. (Словакія)
Вершков О. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Дідур В. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Журавель Д. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Кувачов В. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Кюрчев С. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Скляр О. Г., канд. техн. наук, проф. (Україна)
Скляр Р. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Тітова О. А., д-р пед. наук, проф. (Україна)

SECTORAL MACHINE BUILDING

Beloev Hristo, Dr. Sci. Tech., Prof. (Bulgaria)
Damanauskas Vidas, Dr. Sci. Tech. (Lithuania)
Ivanovs Semjons, Dr. Sci. Tech. (Latvia)
Olt Jüri, PhD, Dr. Sci. Tech., Prof. (Estonia)
Pascuzzi Simone, PhD, Assoc. Prof. (Italia)
Pavol Findura, PhD, Prof. (Slovakia)
Vershkov O, Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Didur V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Zhuravel D., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Kuvachov V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Kiurchev S., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Sclyar O., Cand. Sci. Tech, Prof. (Ukraine)
Sclyar R., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Titova O., Dr. Sci. Ped., Prof. (Ukraine)

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

Шафранець Анджей, д-р техн. наук, проф. (Польща)
Кавакзех Мохаммед, PhD, проф. (Йорданія)
Бур'ян С. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Галько С. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Карпалюк І. Т., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Квітка С. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Кузнєцов М. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Лисенко О. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Мірошник О. О., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Мороз О. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Плюгін В. Є., д-р техн. наук, проф. (Україна)

**ELECTRICAL POWER ENGINEERING,
ELECTRICAL ENGINEERING AND
ELECTROMECHANICS**

Szafraniec Andrzej, Dr. Sci. Tech., Prof. (Poland)
Qawaqzeh Mohamed, PhD, Prof. (Jordan)
Burian S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Halko S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Karpaliuk I., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Kvitka S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Kuznietsov M., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Lysenko O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Miroshnyk O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Moroz O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Pliuhin V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ**

Гавриленко С. А., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Гнатушенко В. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Гумен О. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Дашкевич А. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Лубко Д. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Ляковська С. Є., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Малкіна В. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Мацулевич О. Є., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Холоднік Ю. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Яблонський П. М., канд. техн. наук, доц. (Україна)

ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Дейниченко Г. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Євлаш В. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Ломейко О. П., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Паламарчук І. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Пилипенко Л. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Пріс О. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Самойчук К. О., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Сердюк М. Є., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Ялпачик В. Ф., д-р техн. наук, проф. (Україна)

ПРАЦІ

**Таврійського державного
агротехнологічного університету**

Випуск 25, том 2

Засновник

Таврійський державний агротехнологічний
університет імені Дмитра Моторного

Заснований у 1998 році

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа:
Рішення Національної ради України з питань телебачення і
радіомовлення № 1673 від 23.05.2024 року.

Ідентифікатор медіа: R30-04777.

Суб'єкт у сфері медіа – Таврійський державний
агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
(просп. Богдана Хмельницького, буд. 18, м. Мелітополь
Запорізької обл., 72312, office@tsatu.edu.ua,
тел. (099) 614-83-02).

Виходить 3 рази на рік

Рекомендовано до друку вченою радою
Таврійського державного агротехнологічного
університету імені Дмитра Моторного
Протокол № 10 від 27.05.2025 р.

Відповідно до наказу МОН від 17.03.2020 № 409 видання
включено до Переліку наукових фахових видань України
категорії Б за спеціальностями: F3 Комп'ютерні науки,
G11 Машинобудування (за спеціалізаціями), G3 Електрична
інженерія, G4 Енерговиробництво (за спеціалізацією),
G13 Харчові технології

Адреса редакції

Юридична: 72312, Запорізька обл.
м. Мелітополь, пр. Б. Хмельницького, 18
Фактична: 69600, Запорізька обл. м. Запоріжжя,
вул. Жуковського, 66
<https://oj.tsatu.edu.ua>,
DOI: 10.32782/2078-0877-2025-25-2

COMPUTER SCIENCES

Havrylenko Ye., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Hnatushenko V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Humen O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Dashkevych A., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Lubko D., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Liaskovska S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Malkina V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Matsulevych O., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Kholodniak Y., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Yablonskyi P., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)

FOOD TECHNOLOGIES

Deynichenko G., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Evlash V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Lomeiko O., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Palamarchuk I., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Pylypenko L., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Priss, O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Samoichuk K., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Serdyuk M., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Yalpachik V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

**PROCEEDINGS OF TAVRIA STATE
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY**

Issue 25, volume 2

Founder

Dmytro Motornyi Tavria State
Agrotechnological University

Founded in 1998

Print media registration: Decision of the National Council
of Ukraine on Television and Radio Broadcasting
No. 1673 as of 23.05.2024. Media ID: R30-04777.

The media entity is Dmytro Motornyi Tavria State
Agrotechnological University (72312, Zaporizhzhia region,
Melitopol, 18, B. Khmelnytskyi Ave,
office@tsatu.edu.ua, tel. (099) 614-83-02).

Published 3 times a year

Recommended for publication by the Academic
Board of Dmytro Motornyi Tavria State
Agrotechnological University
Record No. 10, dated May 27, 2025

According to the Order of the MES of Ukraine as of 17.03.2020,
No. 409, the journal is included in the List of professional
scientific editions of Ukraine (category "B") in the following
specialties: F3 Computer Sciences, G11 Mechanical Engineering
(by specialization), G3 Electrical Engineering, G4 Energy
Production (by specialization), G13 Food Technology

Address of the Editorial office

Legal address: 72312, Zaporizhzhia region
Melitopol, 18, B. Khmelnytskyi Ave.
Actual address: 69600, Zaporizhzhia region Zaporizhzhia, 66,
Zhukovskiy Str.
<https://oj.tsatu.edu.ua>,
DOI: 10.32782/2078-0877-2025-25-2

© Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного, 2025

ЗМІСТ

ЕНЕРГОВИРОБНИЦТВО (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЄЮ)

<i>В. Б. Гулевський, Ю. О. Постол</i> УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ ТА ВЕНТИЛЯЦІЇ.....	10
<i>К. В. Демченко, О. М. Піскарьов, А. О. Панов, С. В. Галько, А. І. Середа</i> ПІДТРИМАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ СПОЖИВАЧІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....	16
<i>І. Т. Карпалюк, В. М. Баженов, М. М. Одєгов, О. О. Горюн</i> ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ МІСЦЕВИХ ЛІНІЙ	31
<i>Є. О. Кауркін</i> НИЗЬКА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ ТЕПЛОПОСТАЧАЮЧОГО ПІДПРИЄМСТВА.....	37
<i>В. М. Козін, О. Ю. Савойський, Г. В. Барсукова, Т. С. Вольвач, О. В. Рясна, А. Ю. Марченко</i> СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ГЕЛІОПАНЕЛЕЙ.....	45
<i>О. В. Лука</i> ВПЛИВ МЕЖЕВИХ ЗНАЧЕНЬ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	54
<i>О. О. Мірошник, В. Г. Пазій, Д. Г. Миргород, С. В. Галько, Р. О. Ганус</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ПРИСТРОЮ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ РС830-ДЗ КОМПАНІЇ «РЗА СИСТЕМЗ» З ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ ТА СУЧАСНИМИ ЦИФРОВИМИ АНАЛОГАМИ.....	62
<i>Р. В. Оксенич, С. В. Галько, А. І. Середа, С. А. Попадченко, Д. М. Зеленков</i> ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЛІТІЙ-ЗАЛІЗО-ФОСФАТНИХ ТА НАТРІЙ-ІОННИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ.....	71
<i>Р. В. Оксенич, О. О. Мірошник, О. М. Мороз, С. В. Галько, С. А. Попадченко</i> МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ КУТА НАХИЛУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	82
<i>І. М. Трунова, А. І. Середа, О. А. Савченко, С. В. Галько, С. А. Попадченко</i> ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ЖИЛИ КАБЕЛЮ.....	89
<i>І. М. Трунова, А. І. Середа, О. А. Савченко, С. А. Попадченко, С. В. Галько</i> ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА МОДЕЛЬ КАПІТАЛЬНОГО РЕМОНТУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ІЗ ЗАМІНОЮ ОБМОТОК	98

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

<i>О. О. Вершков, О. Є. Мацулевич, М. В. Супрун, І. Р. Тетервак</i> МОДЕЛЮВАННЯ КУЛАЧКІВ ЗУБОЗАТОЧУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ.....	106
--	-----

<i>Є. А. Гавриленко, О. Є. Мацулевич, А. П. Чаплінський, І. Р. Тетервак, М. В. Супрун</i> ТЕХНІЧНА ПІДГОТОВКА ВИРОБНИЦТВА ДЕТАЛІ «КОРПУС РОЗПОДІЛЮВАЧА».....	111
<i>О. О. Дереза, О. Є. Мацулевич, Г. В. Антонова, О. Ю. Михайленко</i> АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПРОФІЛЮВАННЯ ЧЕРВ'ЯЧНИХ ФРЕЗ БЕЗ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ.....	120
<i>D. Lubko, Yu. Sitsylitsyn</i> FEASIBILITY AND METHODS OF DESIGNING DIGITAL PLATFORMS FOR FARMING.....	127
<i>О. Є. Мацулевич, О. О. Вершков, А. П. Чаплінський, М. В. Супрун</i> МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОПОДІБНИХ ПРОТЕЗІВ У ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ DENTCAD.....	134

МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯМИ)

<i>Г. І. Дашивець, О. В. В'юник</i> ВПЛИВ ПОКАЗНИКІВ РОБОЧОЇ СИЛИ НА ЯКІСТЬ РЕМОНТУ МАШИН.....	141
<i>G. Deynichenko, D. Dmytrevskiy, D. Honchar, V. Chervonyi, D. Horielkov</i> REVIEW AND ANALYSIS OF MEMBRANE JUICE PROCESSING IN FOOD INDUSTRY ENTERPRISES.....	148
<i>О. О. Ковальов, К. О. Самойчук, Б. В. Болтянський, В. Б. Гулевський, І. С. Панов</i> УПРОВАДЖЕННЯ КУЛЬТУРИ СОРТУВАННЯ СМІТТЯ В УКРАЇНІ: ПРОБЛЕМИ ТА ПОЗИТИВНИЙ ДОСВІД РОЗВИНЕНИХ КРАЇН.....	157
<i>О. С. Ковязін, І. О. Чижиков, О. О. Дереза</i> ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ ТВАРИННИЦТВА.....	163
<i>С. В. Коробка, Б. В. Болтянський, Р. В. Скляр, І. Г. Стукалець, Р. Б. Шеремета</i> ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ СИСТЕМИ «ФОТОМОДУЛЬ – АКУМУЛЯТОР».....	170
<i>В. П. Кувачов, В. М. Дружич, С. О. Шевченко, К. О. Зеленов</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАВІСНОГО ЗНАРЯДДЯ НА РОЗПОДІЛ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ КОЛЕСАМИ БАГАТОВІСНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗАСОБУ	185
<i>Н. О. Паляничка, О. О. Червоткіна, О. О. Ковальов</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДИСПЕРГУВАННЯ НА ПІДПРИЄМСТВІ З ВИРОБНИЦТВА МОЛОЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ.....	193
<i>А. І. Панченко, А. А. Волошина, І. А. Панченко, В. Б. Мітков, А. А. Волошин</i> СТАБІЛІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГІДРОПРИВОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАСИВНИХ ГАСНИКІВ ПУЛЬСАЦІЙ.....	200
<i>К. О. Самойчук, Є. Р. Прісс</i> АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ РОТОРНИХ ДИСПЕРГАТОРІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ГОМОГЕННИХ БІЛКОВИХ СТРУКТУР.....	212

<i>К. О. Самойчук, В. А. Самохвал</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ ВІДХОДІВ ПРОВІЮВАННЯ СОНЯШНИКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗМІННИХ ШНЕКІВ.....	220
---	-----

<i>О. О. Червоткіна, О. П. Прокопенко, Н. О. Паляничка</i> ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ПАЛИВНИХ ПЕЛЛЕТ ІЗ ДЕРЕВИНИ ЛИСТЯНИХ ПОРІД.....	228
---	-----

ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Н. В. Будник, О. В. Калашник, А. П. Кайнаш, В. О. Назаренко, В. М. Юхно</i> БЕЗПЕЧНІСТЬ СУМІШЕЙ МОЛОЧНИХ СУХИХ ДЛЯ ДИТЯЧОГО ХАРЧУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ	232
--	-----

<i>Л. П. Король-Безпала, І. Ф. Безпалій, А. П. Король, Л. В. Бондаренко, С. А. Наріжний</i> АНАЛІЗ МІНЕРАЛЬНОГО СКЛАДУ АРАХІСУ, ЩО РЕАЛІЗУЄТЬСЯ В ТОРГОВЕЛЬНИХ МЕРЕЖАХ УКРАЇНИ.....	239
---	-----

<i>Р. Ю. Кравченко, І. Я. Стадник, В. А. Піддубний, Я. В. Євчук</i> МОДИФІКАЦІЯ БУРЯКОВОГО КВАСУ РОСЛИННОЮ СИРОВИНОЮ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ТІСТА ТА ХЛІБА.....	246
--	-----

<i>М. Є. Сердюк, В. М. Бандура, С. Л. Олюніна, Т. О. Колісніченко</i> ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ФРУКТОВО-ЯГІДНОГО ПЮРЕ-ОСНОВИ ДЛЯ НАПОЇВ ПІДВИЩЕНОЇ ХАРЧОВОЇ ЦІННОСТІ.....	254
---	-----

<i>Н. М. Стукальська, Т. А. Осьмак</i> ТЕХНОЛОГІЯ ДЕСЕРТНИХ СТРАВ ЯПОНСЬКОЇ КУХНІ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛОКАЛЬНОЇ СИРОВИНИ.....	262
---	-----

CONTENTS

ENERGY PRODUCTION (WITH SPECIALIZATIONS)

V. Hulevskyi, Y. Postol

IMPROVEMENT OF HEATING AND VENTILATION SYSTEMS.....10

K. Demchenko, O. Piskarev, A. Panov, S. Halko, A. Sereda

MAINTAINING THE QUALITY OF ELECTRICITY FOR CONSUMERS
WITH THE HELP OF FUZZY LOGIC.....16

I. Karpaliuk, V. Bajenov, M. Odiehov, O. Horiun

EFFICIENCY OF RELAY PROTECTION
FOR LOCAL POWER TRANSMISSION LINES.....31

Y. Kaurkin

POOR POWER QUALITY IN THE ELECTRICAL NETWORK SUPPLYING
THE PUMPING STATIONS OF A HEAT SUPPLY ENTERPRISE.....37

V. Kozin, O. Savoiskyi, H. Barsukova, T. Volvach, O. Rysnaya, A. Marchenko

CURRENT STATE AND PERSPECTIVE DIRECTIONS OF DEVELOPMENT
OF SOLAR PANELS PRODUCTION TECHNOLOGIES.....45

O. Luka

THE IMPACT OF HEAT SUPPLY LIMIT VALUES
ON ELECTRIC POWER QUALITY.....54

O. Miroshnyk, V. Pazyi, D. Myrghorod, S. Halko, R. Hanus

RESEARCH AND COMPARISON OF CHARACTERISTICS
OF THE MICROPROCESSOR RELAY PROTECTION DEVICE PC830-Д3
OF RPA SYSTEMS WITH ELECTROMECHANICAL
AND MODERN DIGITAL ANALOGUES.....62

R. Oksenysh, S. Halko, A. Sereda, S. Popadchenko, D. Zelenkov

COMPARATIVE ANALYSIS OF LITHIUM-IRON-PHOSPHATE
AND SODIUM-ION ENERGY STORAGE DEVICES.....71

R. Oksenysh, O. Miroshnyk, O. Moroz, S. Halko, S. Popadchenko

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE TILT ANGLE
OF PHOTOVOLTAIC PANELS.....82

I. Trunova, A. Sereda, O. Savchenko, S. Halko, S. Popadchenko

RESEARCH OF A MATHEMATICAL MODEL OF TEMPERATURE CHANGE
IN THE CORE OF CABLE.....89

I. Trunova, A. Sereda, O. Savchenko, S. Popadchenko, S. Halko

TECHNO-ECONOMIC MODEL OF POWER TRANSFORMER OVERHAUL
WITH REPLACEMENT OF WINDINGS.....98

COMPUTER SCIENCES

O. Vershkov, O. Matsulevych, M. Suprun, I. Tetervak

MODELING THE CAMS OF THE DENTACING MACHINES.....106

<i>Y. Havrylenko, O. Matsulevych, A. Chaplinskyi, I. Tetervak, M. Suprun</i> TECHNICAL PREPARATION OF PRODUCTION PARTS «DISTRIBUTOR HOUSING».....	111
<i>O. Dereza, O. Matsulevych, G. Antonova, O. Mykhaylenko</i> AUTOMATION OF THE PROFILING PROCESS OF WORM CUTTERS WITHOUT INTERFERENCE.....	120
<i>D. Lubko, Yu. Sitsylitsyn</i> FEASIBILITY AND METHODS OF DESIGNING DIGITAL PLATFORMS FOR FARMING.....	127
<i>O. Matsulevych, O. Vershkov, A. Chaplinskyi, M. Suprun</i> DENTAL BRIDGE MODELING IN THE PROGRAM PACKAGE DENTCAD.....	134

MACHINE BUILDING (BY SPECIALIZATIONS)

<i>H. Dashyvets, O. Viunyk</i> THE INFLUENCE OF LABOR FORCE INDICATORS ON THE QUALITY OF MACHINE REPAIR.....	141
<i>G. Deynichenko, D. Dmytrevskiy, D. Honchar, V. Chervonyi, D. Horielkov</i> REVIEW AND ANALYSIS OF MEMBRANE JUICE PROCESSING IN FOOD INDUSTRY ENTERPRISES.....	148
<i>A. Kovalyov, K. Samoichuk, B. Boltyansky, V. Hulevskiy, I. Panov</i> IMPLEMENTATION OF A WASTE SORTING CULTURE IN UKRAINE: PROBLEMS AND POSITIVE EXPERIENCE OF DEVELOPED COUNTRIES.....	157
<i>O. Koviazin, I. Chyzyhykov, O. Dereza</i> WAYS TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY IN LIVESTOCK PRODUCTION.....	163
<i>S. Korobka, B. Boltianskyi, R. Skliar, I. Stukalets, R. Sheremeta</i> JUSTIFICATION OF THE ENERGY ANALYSIS OF THE PHOTOMODULE-BATTERY SYSTEM.....	170
<i>V. Kuvachov, V. Druzhych, S. Shevchenko, K. Zelenov</i> RESEARCH ON THE IMPACT OF MOUNTED IMPLEMENTS ON LOAD DISTRIBUTION AMONG THE WHEELS OF A MULTI-AXLE POWER UNIT.....	185
<i>N. Palianychka, O. Chervotkina, A. Kovalov</i> RESEARCH INTO THE USE OF ENERGY-EFFICIENT EQUIPMENT FOR DISPERSION AT A DAIRY PRODUCTION ENTERPRISE.....	193
<i>A. Panchenko, A. Voloshina, I. Panchenko, V. Mitkov, A. Voloshin</i> STABILIZATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A HYDRAULIC DRIVE USING PASSIVE PULSATION DAMPERS.....	200
<i>K. Samoichuk, Y. Priss</i> ANALYSIS OF ROTARY DISPERSOR DESIGNS FOR CREATING HOMOGENEOUS PROTEIN STRUCTURES.....	212
<i>K. Samoichuk, V. Samokhval</i> STUDY OF THE PROCESS OF COMPACTION OF SUNFLOWER HULLING WASTE USING A SCREW PRESS EXTRUDER.....	220

<i>O. Chervotkina, O. Prokopenko, O. Palyanychka</i> FEATURES OF TECHNOLOGY OF FUEL PELLETS MADE FROM HARDWOOD.....	228
--	-----

FOOD TECHNOLOGIES

<i>N. Budnyk, O. Kalashnyk, A. Kainash, V. Nazarenko, V. Yukhno</i> SAFETY OF DRY MILK MIXTURES FOR BABY NUTRITION OF ADVANCED TECHNOLOGY.....	232
<i>L. Korol-Bezpala, I. Bezpalyi, A. Korol, L. Bondarenko, S. Narizhnyy</i> ANALYSIS OF MINERAL STOCK OF PEANUTS SOLD IN UKRAINIAN RETAIL NETWORKS.....	239
<i>R. Kravchenyuk, I. Stadnyk, V. Piddubny, Ya. Yevchuk</i> MODIFICATION OF BEET KVAS WITH VEGETABLE RAW MATERIALS TO IMPROVE THE QUALITY OF DOUGH AND BREAD.....	246
<i>M. Serdyuk, V. Bandura, S. Oliunina, T. Kolysnichenko</i> TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE PRODUCTION OF FRUIT AND BERRY PUREE-BASE FOR BEVERAGES WITH INCREASED NUTRITION VALUE.....	254
<i>N. Stukalska, T. Osmak</i> TECHNOLOGY OF JAPANESE CUISINE DESSERTS USING LOCAL RAW MATERIALS.....	262



ЕНЕРГОВИРОБНИЦТВО (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЮ)

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-1>

УДК 006.91

В. Б. Гулевський, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-1434-9724

Ю. О. Постол, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-0749-3771

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: yulia.postol@tsatu.edu.ua

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ ТА ВЕНТИЛЯЦІЇ

Анотація. Роботу присвячено питанням удосконалення інженерних систем вентиляції під час проєктування систем опалення та вентиляції для житлових і комерційних будівель.

Під час проєктування систем опалення та вентиляції для житлових і комерційних будівель важливо забезпечити їх високу енергоефективність та економічність. Для підтримки комфортних умов мікроклімату в приміщеннях витрачається до 60% витрачених енергоресурсів. До основних споживачів теплової енергії в таких будівлях належать системи вентиляції та кондиціонування повітря.

Важливим напрямом використання низькопотенційної теплової енергії є утилізація теплоти витяжного повітря для підігріву зовнішнього припливного повітря.

Відпрацьоване тепло – це стійка енергія, одержувана в результаті неефективного використання палива в різних процесах, що становить від 20% до 50% загального обсягу споживаної енергії [1; 2]. І саме тут стане в нагоді рекуперація тепла в системах вентиляції, тобто з поверненням тепла назад до будівлі разом із чистим свіжим повітрям.

Такий підхід до проєктування інженерних систем забезпечення мікроклімату приміщень дає змогу знизити витрати на нагрівання припливного повітря та підвищити теплову ефективність систем.

Усе вищезазначене зумовлює актуальність удосконалення інженерних систем вентиляції, що дасть змогу зменшити як витрати на споживання електроенергії, так і вплив шкідливих викидів в атмосферу на навколишнє середовище.

Ключові слова: рекуперація, тепла енергія, проєктування, вентиляція.

Постановка проблеми. Припливно-витяжні установки з рекуперацією тепла можуть забезпечити значну економію кінцевої та первинної енергії. Ефективність рекуперації відпрацьованого тепла залежить від сфери застосування, будівельного матеріалу, а також хімічних та фізичних умов двох потоків, де відбувається теплообмін [3; 4]. Кожен тип рекуператора тепла має свої переваги, недоліки і відповідні сфери застосування.

Характеристики будівлі визначають тип обладнання для рекуперації тепла, яке буде встановлено. Вентиляційні рекуператори включають обертові теплові колеса, пластинчасті теплообмінники, теплові трубки, циркуляційні системи та теплові насоси.

Кожна інвестиція у рекуперацію тепла залежить від рентабельності, будівельних норм і обсягу реконструкції. На основі досліджень [5–8] було зроблено висновок, що поєднання модернізації, що складається з герметизації огорожувальних конструкцій будівлі та використання вентиляції з рекуперацією тепла, дає змогу зменшити загальну кількість енергії для опалення приміщень на 78% і скоротити викиди парникових газів на 83%.



Однак конструкція систем рекуперації тепла має ключове значення для того, щоб система теплообмінника працювала настільки ефективно, як очікується. Без належного проектування таких систем теплові труби не здатні транспортувати достатньо тепла і можуть діяти як дуже поганий теплопровідник у системах.

Аналіз останніх досліджень. Припливно-витяжна вентиляція з рекуперацією тепла працює за принципом теплообміну: нагріте повітря в приміщенні проходить через теплообмінник, нагріваючи його елементи з високою теплопровідністю, такі як мідь, алюміній або оцинкована сталь. З іншого боку теплообмінника подається холодне повітря з вулиці, яке нагрівається нагрітими елементами теплообмінника.

Автоматичний контроль підтримує задані параметри температури. У разі великої різниці температур усередині та зовні будівлі система може бути додатково оснащена незалежними опалювальними установками, такими як теплові насоси, електрообігрівачі тощо [9].

Особливостями таких систем є:

- повітряний потік циркулює по замкнутому контуру, не змішуючись із зовнішнім повітрям, що забезпечує чисте повітря в приміщенні;
- передбачена додаткова фільтрація повітря для захисту обладнання від забруднень, включаючи пил, бруд, дрібних комах;
- відпрацьоване повітря також очищається від шкідливих домішок, біологічних компонентів і неприємних запахів;
- ізоляція припливної установки сприяє стабілізації температури повітря, що поступає, і знижує рівень шуму в приміщенні. Використання звукоізоляційних корпусів робить систему практично безшумною.

Однією з основних характеристик рекуператорів тепла є коефіцієнт тепловіддачі, який відображає здатність приладу передавати тепло між повітряними потоками. Чим вищий коефіцієнт теплопередачі, тим ефективніше працює рекуператор, зменшуючи витрати енергії на опалення та кондиціонування.

В останні роки технологія теплової труби все частіше використовується у сфері обслуговування будівель для підвищення економії енергії та теплових характеристик теплообмінників у комерційних системах [7; 8; 10].

Використання системи рекуперації відпрацьованого тепла з тепловою трубою є іншим методом економії енергії та зниження наслідків глобального потепління [4; 5].

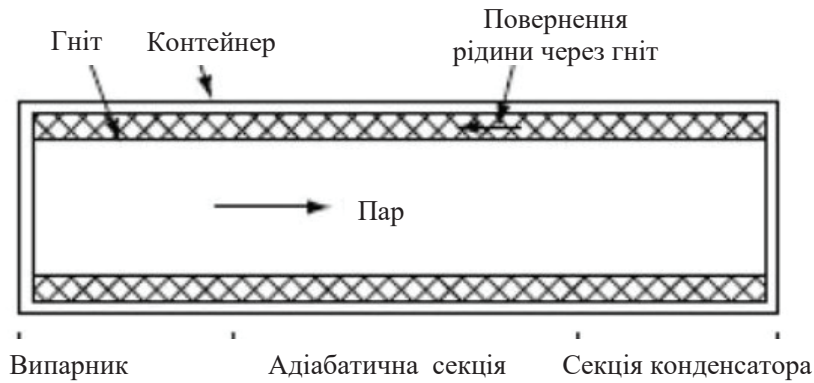
Теплова трубка – дуже ефективний пасивний пристрій, який використовується для передачі тепла. Теплові трубки забезпечують передачу тепла по висоті на великому просторі з мінімальними перепадами температур, простою конструкцією та легким керуванням, а також відсутністю необхідності перекачування [6; 7].

Існує три поширені типи теплових труб: звичайна теплова труба, термосифонна та осцилююча теплова труба. Кожен тип містить три секції: випарник, адіабатичну та конденсаторну.

У теплових трубках використовується багатофазний процес передачі тепла від потоку повітря до іншого [7; 8]. Теплова трубка являє собою трубку, що містить гнільну структуру, частково заповнену рідиною в насиченому стані, яка вистелена на внутрішній поверхні та поділена на три секції, як показано на рис. 1.

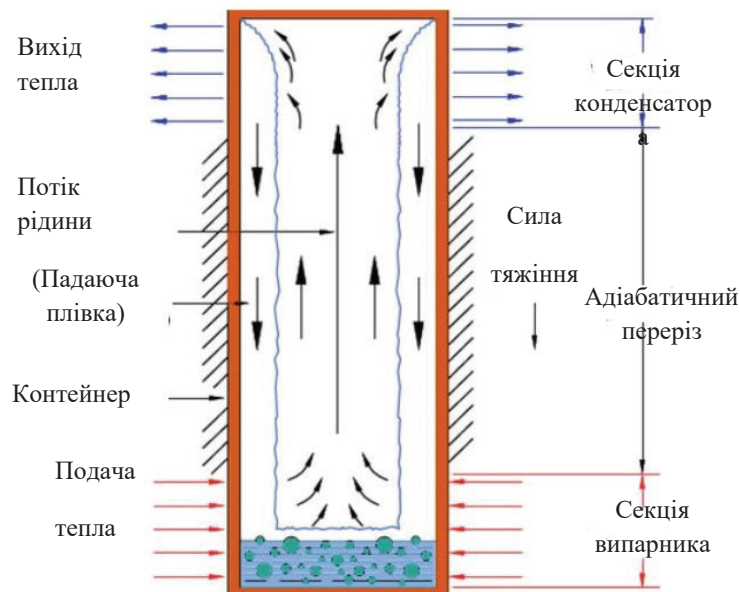
Частина випарника, де додається тепло і рідка фаза переходить у парову фазу, область конденсатора на іншому кінці, де тепло розсіюється і відбувається процес конденсації, і адіабатична (ізольована) зона між ними, де тепло не надходить і не виходить в цій секції теплової труби, і дві фази робочої рідини (рідина і пар).

Термосифон – це проста двофазна замкнута теплова труба, але ефективний пристрій для передачі тепла. Це без гнітлива теплова труба з невеликою кількістю резервуару рідини в нижній частині.

**Рис. 1. Схема роботи звичайної теплової трубки**

На рис. 2 показано роботу з термосифона. Тепло, що надходить через секцію випарника, перетворює рідину на пар. Пара піднімається і переміщається через адіабатичну область у секцію конденсатора. Пара конденсується і віддає своє приховане тепло у секції конденсатора. Потім рідина була змушена повернутися до секції випарника у вигляді рідкої плівки під дією сили тяжіння [10].

Термосифон є безгнітовою тепловою трубкою, тому гравітація є основною рушійною силою для повернення конденсату у випарну секцію, і капілярна межа, як правило, не має значення під час роботи термосифона.

**Рис. 2. Схема роботи термосифонної теплової труби**

Теплова труба як надійне та недороге рішення була досліджена та експериментально використана багатьма авторами для відновлення втраченої енергії у багатьох інженерних додатках [6–8; 10; 11].

Формулювання цілей статті. Ураховуючи тенденції та перспективи використання технології теплових труб, існує потреба в удосконаленні інженерних систем під час проектування систем опалення та вентиляції для житлових та комерційних будівель для підвищення рівня енергозбереження.

Основна частина. Технічно конструкція вентиляційно-нагрівального пристрою з тепловими трубами містить стіни 1, канал для витяжного повітря 2, вентилятор 3, канал для припливного повітря 4, між каналами 2 і 4 витяжного та припливного повітря встановлено теплові труби 5, конденсаційні зони 6 яких розміщено у каналі для припливного повітря 4, а випарні зони 7 – у каналі для витяжного повітря 2 з вентилятором 3 (рис. 3) [12].

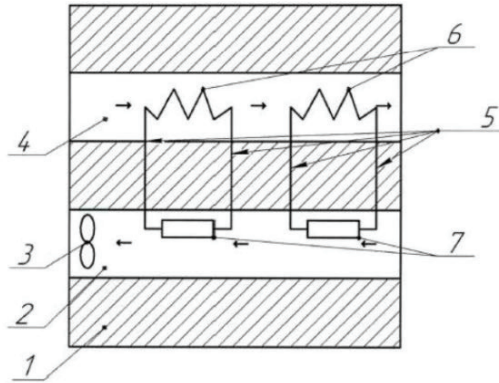


Рис. 3. Вентиляційно-нагрівальний пристрій

Пристрій працює так. Теплова енергія приміщення, яке вентилюється через канал для витяжного повітря 2 у стіні 1 завдяки вентилятору 3 потрапляє до випарних зон 7 теплових труб 5, де здійснюється процес випаровування робочої рідини. Пори робочої рідини теплових труб 5, підіймаючись до конденсаційної зони 6, конденсуються завдяки холодному повітрю оточуючого середовища, яке потрапляє у канал для припливного повітря 4. При цьому припливне повітря підігрівается практично до температури витяжного повітря. Далі під дією гравітаційних сил конденсат надходить у випарну зону 7 у рідкому вигляді, де він знову закипає, відбирає теплоту з приміщення, яке охолоджується. Далі цикл повторюється.

Вентиляційно-нагрівальний пристрій містить стіни, канал для витяжного повітря, вентилятор, канал для припливного повітря, який відрізняється тим, що між каналами витяжного і припливного повітря встановлені теплові труби, конденсаційні зони яких розміщено у каналі для припливного повітря, а випарні зони – у каналі для витяжного повітря з вентилятором.

У технічних характеристиках рекуперативних вентиляційних установок, як правило, вказуються два значення коефіцієнта рекуперації – коефіцієнт ефективності теплообміну, розрахований з урахуванням температури повітря, і коефіцієнт ефективності регенерації тепла, розрахований з урахуванням ентальпії (кількість енергії, яку можна перетворити на теплоту).

Визначення коефіцієнта рекуперації наведено в багатьох довідкових посібниках [11]. Оцінити ефективність рекупераційної установки, основним завданням якої є передача теплової енергії від витяжного повітря до припливного, можна з використанням двох простих і важливих показників: температури зовнішнього повітря, що надходить перед рекуператором, і температури повітря, що видаляється з приміщення після рекуператора:

$$k = T_1 - T_2, \quad (1)$$

де T_1 – температура повітря, що видаляється після рекуператора, °K; T_2 – температура зовнішнього повітря (припливного повітря), °K.

Коефіцієнт рекуперації теоретично може змінюватися від 0 до 100%, але в практиці – часто від 25% до 95%. Можна припустити, що високий коефіцієнт рекуперації, як і здатність передачі великої потужності, передбачає високі споживчі якості устаткування. Однак

насправді такого прямого зв'язку не спостерігається, усе залежить від умов використання теплообміну.

Якщо теплоносій, від якого відбирається тепло або холод, використовується одноразово, тобто не зациклюється, а відразу після використання безповоротно скидається в зовнішнє середовище, для ефективного використання цього тепла бажано використовувати пристрій із високим коефіцієнтом рекуперації. Для повітряно-повітряних теплообмінників це використання тепла витяжного повітря, яке відразу після теплообміну йде в зовнішнє середовище.

Висновки. Аналіз літературних досліджень показав, що одним із методів удосконалення інженерних систем вентиляції під час проєктування систем опалення та вентиляції для житлових та комерційних будівель є використання технології теплових труб. Застосування вентиляційно-нагрівального пристрою запропонованої конструкції дає змогу підвищити ефективність теплопередачі та рекуперації теплової енергії завдяки встановленню теплових труб між каналами витяжного і припливного повітря так, що конденсаційні зони їх розміщено у каналі для припливного повітря, а випарні зони – у каналі для витяжного повітря з вентилятором.

Список використаних джерел

1. Постол Ю.О., Стручаєв М.І., Гулевський В.Б. Сучасні способи модернізації існуючих систем теплопостачання. *Меліорація та водовикористання. З нагоди 90-річчя навчального закладу «Від технікуму до фахового коледжу» (присвячено 90-річчю ВСП «Мелітопольський фаховий коледж ТДАТУ»)*: матеріали XIV науково-практичної Інтернет-конференції, м. Мелітополь, 22–29 жовтня 2021 р. Мелітополь, 2021. С. 14–20.
2. K.S. Ong, 'Review of Heat Pipe Heat Exchangers for Enhanced Dehumidification and Cooling in Air Conditioning Systems', *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 11, pp. 416–423, 2016.
3. Yau Y.H., 2007, Application of a heat pipe heat exchanger to dehumidification enhancement in a HVAC system for tropical climates a baseline performance characteristics study, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46 (2007), pp. 164–1714.
4. Постол Ю., Гулевський В. Застосування теплонасосних установок для утилізації теплоти вторинних енергетичних ресурсів. *Вплив виробництва, передачі, розподілу та використання електроенергії на навколишнє середовище*: зб. матеріалів Міжнар. наук.-практ. конф., м. Івано-Франківськ, 24–25 листопада 2022 р. / за заг. ред. проф. Я.О. Адаменка. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2022. С. 132–136.
5. Barrak, A. (2021). Heat Pipes Heat Exchanger for HVAC Applications. *IntechOpen*. doi: 10.5772/intechopen.95530
6. Zender-Świercz, E. (2021). A Review of Heat Recovery in Ventilation. *Energies*, 14(6), 1759. <https://doi.org/10.3390/en14061759>
7. Lin, S., Broadbent, J., McGlen, R. Numerical study of heat pipe application in heat recovery systems. *Appl. Therm. Eng.* 2005, 25, 127–133. [Google Scholar] [CrossRef]
8. W. Srimuang, and P. Amatachaya, 'A review of the applications of heat pipe heat exchangers for heat recovery', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, pp. 4303–4315, 2012.
9. Гулевський В.Б., Кузнецов И.А. Современные тенденции в автоматизации технологических процессов. *Науковий вісник ТДАТУ*. Вип. 9.Т. 1. doi: 10.31388/2220-8674-2019-1-49
10. Reay, D., McGlen, R., Kew, P. *Heat Pipes: Theory, Design and Applications*; Elsevier: Oxford, UK, 2014. [Google Scholar]
11. Основні залежності та приклади розрахунків теплообмінних апаратів : навчальний посібник / уклад. Л.Г. Воронін, А.Р. Степанюк, Л.І. Ружинська. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 68 с.
12. Вентиляційно-нагрівальний пристрій : пат. 146457 Україна : (19)UA (11)146457 (13)U (51) МПК F24F 7/06 (2006.01) (21) № у 2020 05317 ; заявл. 17.08.2020 ; опубл. 24.02.2021 Бюл. № 8. 4 с.

Стаття надійшла до редакції 15.04.2025



V. Hulevskyi, Y. Postol

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

IMPROVEMENT OF HEATING AND VENTILATION SYSTEMS

Summary

The work is devoted to the issues of improving engineering ventilation systems when designing heating and ventilation systems for residential and commercial buildings.

When designing heating and ventilation systems for residential and commercial buildings, it is important to ensure their high energy efficiency and cost-effectiveness. Up to 60% of energy resources are spent to maintain comfortable microclimate conditions in premises. The main consumers of thermal energy in such buildings include ventilation and air conditioning systems.

An important area of use of low-potential thermal energy is the utilization of exhaust air heat for heating external supply air.

Waste heat is a sustainable energy resulting from the inefficient use of fuel in various processes, accounting for 20% to 50% of total energy consumption. This is where heat recovery in ventilation systems comes in handy, i.e. returning heat back into the building, along with clean fresh air.

This approach to the design of engineering systems for ensuring the microclimate of the application allows you to reduce the costs of heating the supply air and increase the thermal efficiency of the system. All of the above increases the relevance of improving engineering ventilation systems, which reduces both the costs of electricity consumption and the impact of harmful emissions into the atmosphere on the environment.

Keywords: recovery, thermal energy, design, ventilation.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2>

УДК 621.311.1.004.18

К. В. Демченко¹, канд. техн. наук
О. М. Піскарьов², канд. техн. наук
А. О. Панов¹, аспірант
С. В. Галько³, канд. техн. наук
А. І. Середа¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3168-5351
ORCID: 0000-0002-6980-984X
ORCID: 0000-0002-0688-1430
ORCID: 0000-0001-7991-0311
ORCID: 0000-0002-7670-6822

¹Державний біотехнологічний університет, м. Харків²Харківський національний університет радіоелектроніки³Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: uyaska31@gmail.com

ПІДТРИМАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ СПОЖИВАЧІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Анотація. Відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2030 р., серед напрямів підвищення ефективності енергетичного сектору країни визначено контроль якості електроенергії для споживачів та регулювання напруги і показників якості електроенергії для досягнення стандартів якості. Для завдання нормалізації якості напруги в мережі запропоновано модель регулювання сталого відхилення напруги за допомогою нечіткої логіки, і на основі моделювання показано ефективність запропонованих алгоритмів. Алгоритм управління засновано на нечіткій логіці та розглядається як альтернатива переходу від аналогового управління до цифрової системи управління перемикачем відгалужень обмотки. Результати роботи можуть бути використані під час проектування підстанції для впровадження в енергосистему.

Ключові слова: розподільна мережа, алгоритм управління, набори термінів, якість електроенергії, додаткове навантаження.

Постановка проблеми. Однією з важливих вимог до електропостачання є забезпечення якості електроенергії, під яким розуміють ступінь відповідності показників якості прийнятим стандартам. Відхилення напруги та інших показників якості від установлених стандартів істотно впливає на роботу електрифікованого обладнання та електричних мереж, призводячи до економічного збитку. Тому однією з важливих і актуальних енергетичних проблем в Україні та в усьому світі є нормалізація показників якості електроенергії. За умови дотримання встановлених стандартів якості електроенергії забезпечується електромагнітна сумісність електричних мереж енергопостачальних організацій та електричних мереж споживачів електричної енергії. Відхилення напруги від номінальних значень відбуваються внаслідок добових, сезонних і технологічних змін електричного навантаження споживачів, зміни потужності компенсуючих пристроїв, регулювання напруги генераторами електростанцій і на підстанціях енергосистеми, зміни схеми і параметрів електричних мереж. Якість поставленої електроенергії, як і якість інших товарів та послуг, важко визначити та кількісно оцінити. Не існує одного прийнятого визначення якісної електроенергії. Якість переважно визначається якістю форми сигналу напруги, оскільки неможливо контролювати струми, що споживаються навантаженнями замовника. Якість напруги є не тільки відповідальністю оператора мережі, а й у певному відношенні залежить від виробників і споживачів [1]. ДСТУ EN 50160:2014 нормується відхилення напруги на клеммах приймачів електричної енергії [2]. Відповідно до цього стандарту, нормально допустимі і гранично допустимі значення відхилення напруги повинні дорівнювати $\pm 5\%$ і $\pm 10\%$ від номінального значення напруги в точках спільного приєднання споживачів електричної енергії

і повинні встановлюватися в договорах енергопостачання у години мінімального і максимального навантаження в енергосистемі з урахуванням необхідності дотримання норм стандарту на виводах приймачів електроустановок відповідно до нормативних документів.

Аналіз останніх досліджень. Для регулювання змінної напруги на виході з трансформатора використовується пристрій, у якому напівпровідникові силові ключі перемикають відводи безконтактного пристрою для зміни відгалужень обмотки [3–5]. Відомий також пристрій для перемикавання відгалужень регулюючої обмотки трансформатора під навантаженням, який містить два вакуумних вимикача в розвантаженні з тиристорним включенням і контакторами [6–9]. Аналогічний пристрій для регулювання напруги силового трансформатора з перемиканням вторинної обмотки трансформатора описано в [10; 12; 13]. У статті описано визначення допустимих діапазонів регулювання напруги за допомогою імітаційного моделювання. Пристрій перемикавання відгалужень під навантаженням є елементом з обмеженим ресурсом перемикавання [15; 16]. Механічні пристрої перемикавання під навантаженням мають невпорядкований час перемикавання ≥ 5 . Безконтактні пристрої для зміни відгалужень, у яких використовуються напівпровідникові силові ключі, позбавлені цих недоліків [17–21]. Трансформатори, які оснащені такими пристроями, мають час невпорядкованого перемикавання ≥ 10 мс, а саме перемикавання не супроводжується появою більш високих гармонік, відповідно, поліпшується динамічна стійкість системи регулювання напруги [22; 23]. Пристрій додаткової напруги (ПДН) є конструктивно і функціонально закінченим пристроєм і служить для посилення живлення контактної мережі [24]. ПДН стабілізує напругу контактної мережі шляхом регулювання рівня вихідної напруги тягової підстанції залежно від поточного навантаження [25–26]. Існуючі системи управління перемикаючим пристроєм під навантаженням мають недоліки – висока вартість і обмежена кількість перемикань, що знижує якість регулювання [29–31]. Представлений у статті пристрій не захищає ключі від струмів короткого замикання, і в мережі в проміжних режимах роботи з'являються більш високі гармоніки [32–34]. Недоліком наведеного у статті методу регулювання напруги є те, що перемикавання здійснюється на вторинному боці силового трансформатора, де за значної потужності струм трансформатора досягає декількох тисяч ампер [35–37]. Таким чином, кожен ключ буде складатися з декількох паралельних тиристорів, що економічно не вигідно. Для точного перемикавання положень і ефективної роботи навантажувального пристрою необхідно змінити алгоритмічний складник систем управління під навантаженням [39; 40; 43].

Формулювання мети статті. Удосконалення моделі регулювання показників якості електричної енергії на основі методу нечіткої логіки.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

- розробити алгоритм управління встановленим відхиленням вихідної напруги силового трансформатора на основі нечіткої логіки, який дає змогу підвищити ефективність пристрою перемикавання відгалужень і додаткових пристроїв напруги;
- удосконалити моделі регулювання показників якості електричної енергії на основі методу нечіткої логіки із застосуванням методу обробки та аналізу даних;
- установити взаємозв'язок між ефективністю обробки та аналізу вхідних і вихідних даних та автоматизованим регулюванням якості споживання електроенергії;
- провести порівняльний аналіз моделей обробки та аналізу даних напруги в розподільчих мережах із моделями, отриманими іншими методами.

Основна частина. Однією з основних вимог до електропостачання є забезпечення якості електричної енергії, під яким розуміють ступінь відповідності показників якості прийнятим нормам [10]. Відхилення напруги та інших показників якості від установлених норм істотно впливає на роботу електрифікованого обладнання та електричних мереж, призводить до економічних утрат [11]. Відповідно до встановлених стандартів якості електроенергії, забезпечується електромагнітна сумісність електричних мереж енергопостачальних організацій та

електричних мереж споживачів електроенергії. Відхилення напруги від номінальних значень відбувається внаслідок добових, сезонних і технологічних змін електричного навантаження споживачів, зміни потужності компенсуючих пристроїв, регулювання напруги генераторами електростанцій і на підстанціях енергосистеми, зміни ланцюга і параметрів електричних мереж [38; 41; 42]. Алгоритм управління, заснований на нечіткій логіці, розглядається як альтернатива переходу від аналогового управління до цифрової системи управління перемикачем під навантаженням. Тому алгоритм управління, заснований на нечіткій логіці, може бути використаний для регулювання усталеного відхилення напруги. Для моделювання цієї системи найкраще використовувати додаток Fuzzy Logic Toolbox, який входить до пакету програм MATLAB. Стійке відхилення напруги U_n представлено в нечіткому вигляді, тобто вхідними параметрами системи нечіткого виходу вважаються чотири нечіткі змінні, що відповідають фазним напругам і положенню перемикачів навантажувального пристрою: «Фаза А», «Фаза В», «Фаза С» і «Перемикач пристрою перемикача під навантаженням». А вихідними параметрами є чотири нечіткі змінні: «Положення пристрою перемикача під навантаженням», «Відключення частини навантаження», «Включення додаткового навантаження» і «Включення пристрою додаткової напруги». Функція приналежності до усталених індикаторів напруги (рис. 1), де U_n – номінальне значення відповідного відхилення напруги; $\mu\delta U_{yL}$, $\mu\delta U_{yN}$, $\mu\delta U_{yH}$, є відповідно функцією приналежності до показників установленної нормальної, низької та високої напруги [12; 13].

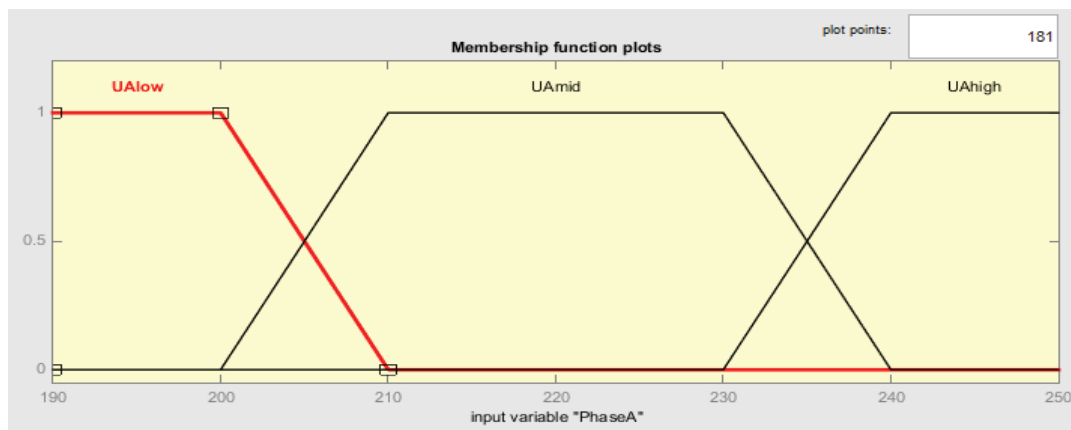


Рис. 1. Функція приналежності для усталених індикаторів напруги

Набір $T_u = \{UA_{low}, UA_{mid}, UA_{high}\}$ (рис. 2). Функції членства термів множин T_u вибираються відповідно до норм стандарту і виглядають так:

$$\mu\delta U_{yL} = \max \{0, \min \{1, \frac{0,95U_n - U}{0,05U_n}\} \}, \quad (1)$$

$$\mu\delta U_{yN} = \max \{0, \min \{1, \frac{U - 0,9U_n}{0,05U_n}, \frac{1,1U_n - U}{0,05U_n}\} \}, \quad (2)$$

$$\mu\delta U_{yH} = \max \{0, \min \{1, \frac{U - 1,05U_n}{0,05U_n}\} \}, \quad (3)$$

де $\mu\delta U_{yL}$, $\mu\delta U_{yN}$, $\mu\delta U_{yH}$ – відповідно функція приналежності до показників установленної нормальної, низької та високої напруги;

U – значення напруги в будь-який час;

U_n – номінальна напруга.

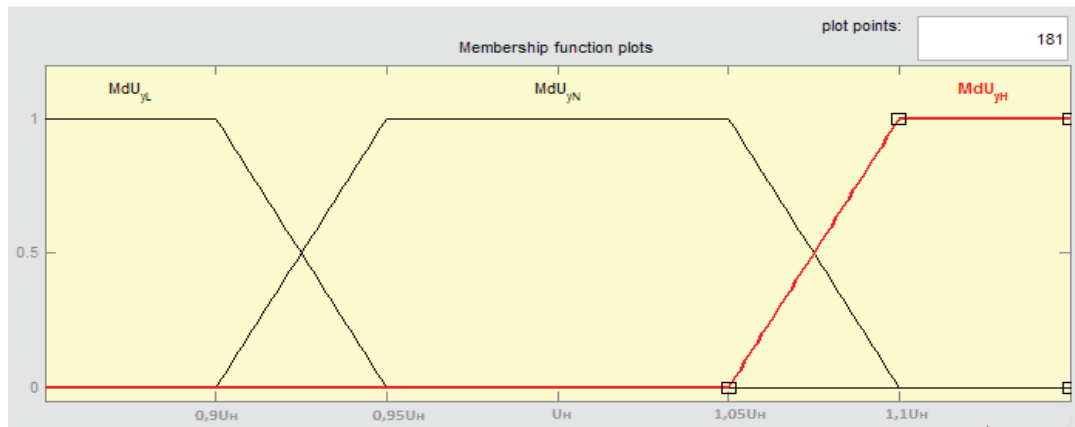


Рис. 2. Функція приналежності для вхідної змінної «Фаза А»

Набір термінів для нечіткої змінної «Фаза В» записується аналогічно «Фаза А» і використовується множина $T_u = \{UBlow, UBmid, UBhigh\}$. Аналогічно записується набір термінів для нечіткої змінної «Фаза С», де використовується набір $T_u = \{UClow, UCmid, UChigh\}$. Тобто множини $UAlow, UBlow, UClow$ є функцією приналежності встановлених показників відхилення, які описують низький ступінь відхилення від вимог норм і стандартів. Множини $UAmid, UBmid, UCmid$ є номінальними значеннями відхилення напруги, які побудовані на основі вимог стандарту IEEE та ДСТУ [2].

Множини $UAhigh, UBhigh, UChigh$ є функцією приналежності встановлених показників відхилення, які описують високий ступінь відхилення від вимог норм і стандартів. Зазначені норми регламентують як допустиме, так і максимально допустиме усталене відхилення напруги, що зручно для опису функції приналежності в трапецієподібному вигляді. По суті, функція приналежності $UAmid$ відповідає розпливчастому поняттю «ступінь задоволеності напругою нормою якості», а $UAlow, UAhigh$ характеризують ступінь відхилення напруги від норми. І множина $T_p = \{OLTC Dmin, OLTC Dmax\}$ (рис. 3).

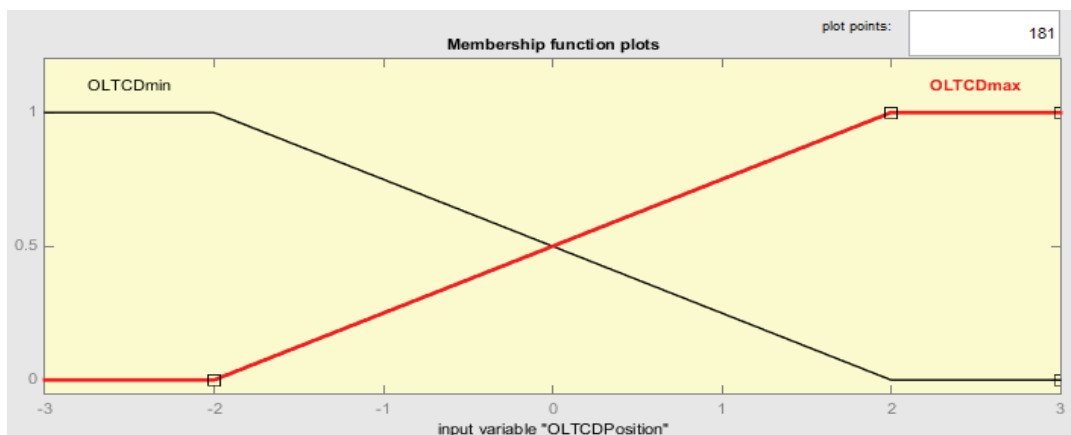


Рис. 3. Функція приналежності для умов вхідної змінної «Положення пристрою перемикавання відгалужень»

При цьому кожна з доданків перших трьох вхідних змінних оцінюється за шкалою від 190 В до 250 В, а четверта вхідна змінна оцінюється за шкалою від -3 до +3 робочих режимів перемикавання пристрою. Набір $T_n = \{OLTC D-, OLTC D+\}$ (рис. 4а) і оцінюється за шкалою від -2 до +2 перемикавання режимів роботи пристрою. Ідеться про таке вживання: збільшення (+),

зменшення (-), не змінювати (0), тобто OLTCD- – зменшення, OLTCD+ – збільшення, а 0 залишається на місці без змін. Набір термінів для нечіткої вихідної змінної «Відключення частини навантаження» використовує набір $To = \{\text{DISABLE PARTS OF THE LOAD}\}$ (рис. 4b) і оцінюється за шкалою від 0 до 200 кВт. Так само створюється набір термінів для нечіткої вихідної змінної «Включення додаткового навантаження», використовується набір $Tv = \{\text{ON load}\}$ (рис. 4c) і аналогічно оцінюється за шкалою від 200 кВт до 600 кВт. А для терміна встановленої для нечіткої вихідної змінної «Включення пристрою ПНД» встановлюється $Td = \{\text{ON. AVD}\}$ (рис. 4d) і розрахований за шкалою від 0 В до 500 В.

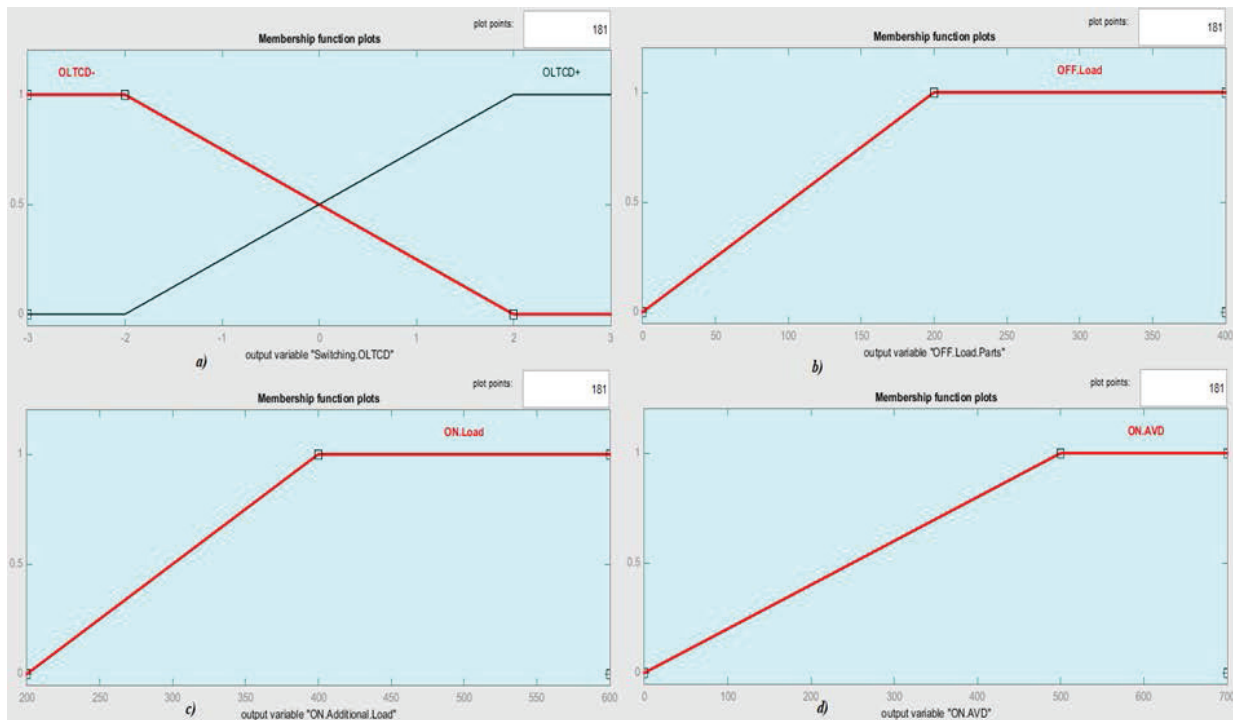


Рис. 4. Допоміжна функція для умов вихідних змінних:

- а) «Перемикання пристрою перемикання відгалужень»;
б) «Відключення частини навантаження»; в) «Включення додаткового навантаження»;
г) «Увімкнення ПДН»

Евристичні знання із цієї проблемної сфери для нормалізації стаціонарного відхилення напруги наведені в правилах логічного висновку

(представлені деякі з правил):

- 1) if $U_{A\text{low}}$ and $OLTCD_{\text{max}} \rightarrow OLTCD+$;
- 2) if $U_{B\text{low}}$ and $OLTCD_{\text{max}} \rightarrow OLTCD+$;
- 3) if $U_{C\text{low}}$ and $OLTCD_{\text{max}} \rightarrow OLTCD+$;
- 4) if $U_{A\text{high}}$ and $OLTCD_{\text{min}} \rightarrow OLTCD-$;
- 5) if $U_{B\text{high}}$ and $OLTCD_{\text{min}} \rightarrow OLTCD-$;
- 6) if $U_{C\text{high}}$ and $OLTCD_{\text{min}} \rightarrow OLTCD-$;
- 7) if $U_{A\text{high}}$ and $OLTCD_{\text{min}} \rightarrow \text{ON load}$;
- 8) if $U_{B\text{high}}$ and $OLTCD_{\text{min}} \rightarrow \text{ON load}$;
- 9) if $U_{C\text{high}}$ and $OLTCD_{\text{min}} \rightarrow \text{ON load}$;
- 10) if $U_{A\text{low}}$ and $U_{B\text{high}}$ and $U_{C\text{low}} \rightarrow \text{ON AVD}$;

- 11) if $U_{A\text{low}}$ and $U_{B\text{low}}$ and $U_{C\text{high}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 12) if $U_{A\text{high}}$ and $U_{B\text{high}}$ and $U_{C\text{low}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 13) if $U_{A\text{high}}$ and $U_{B\text{low}}$ and $U_{C\text{high}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 14) if $U_{A\text{mid}}$ and $U_{B\text{low}}$ and $U_{C\text{high}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 15) if $U_{A\text{low}}$ and $U_{B\text{mid}}$ and $U_{C\text{high}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 16) if $U_{A\text{high}}$ and $U_{B\text{low}}$ and $U_{C\text{mid}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 17) if $U_{A\text{low}}$ and $U_{B\text{high}}$ and $U_{C\text{mid}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 18) if $U_{A\text{mid}}$ and $U_{B\text{high}}$ and $U_{C\text{low}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 19) if $U_{A\text{high}}$ and $U_{B\text{mid}}$ and $U_{C\text{low}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 20) if $U_{A\text{mid}}$ and $U_{B\text{mid}}$ and $U_{C\text{low}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 21) if $U_{A\text{mid}}$ and $U_{B\text{low}}$ and $U_{C\text{high}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 22) if $U_{A\text{mid}}$ and $U_{B\text{low}}$ and $U_{C\text{mid}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 23) if $U_{A\text{mid}}$ and $U_{B\text{high}}$ and $U_{C\text{mid}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 24) if $U_{A\text{low}}$ and $U_{B\text{mid}}$ and $U_{C\text{mid}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 25) if $U_{A\text{high}}$ and $U_{B\text{mid}}$ and $U_{C\text{mid}} \rightarrow ON\ AVD$;

Застосовувавши правила нечіткого виведення, отримаємо результат для конкретних значень вхідних змінних. Після зміни значень вхідних змінних розглядаються результати виконаних вимірювань. Оскільки процес нечіткого моделювання передбачає аналіз результатів нечіткого висновку за різних значень вхідних змінних із метою встановлення адекватності розробленої нечіткої моделі, були розроблені та розглянуті такі випадки. Розглянемо правило логічного висновку для нормалізації сталого відхилення напруги в одній із фаз «Фаза А», «Фаза В» або «Фаза С» (рис. 5), де напруга невелика, а положення пристрою перемикача під навантаженням не встановлено на максимум. Це правило було дано зверху і в повному вигляді має такий вигляд: *if* ($U_{A\text{low}}$ and $U_{B\text{low}}$ and $U_{C\text{low}}$), а не $OLTCD_{\text{max}} \rightarrow OLTCD_{+}$. На рис. 5 у першому правилі наведено значення «Фаза А» для позиції низької напруги, тобто «Фаза А» має значення 191 В, у заданих правилах логічного висновку це виглядає як $U_{A\text{low}}$, а в цей момент фази «Фаза В» і «Фаза С» відповідають номінальному значенню напруги 220 В ($U_{B\text{mid}}$, $U_{C\text{mid}}$). «Положення пристрою перемикачання» не встановлено в максимальне положення ($OLTCD_{\text{max}}$) і має значення -1,98, у зв'язку з чим розроблена система нечіткого виведення рекомендує перевести перемикач в положення 1 [14; 15].

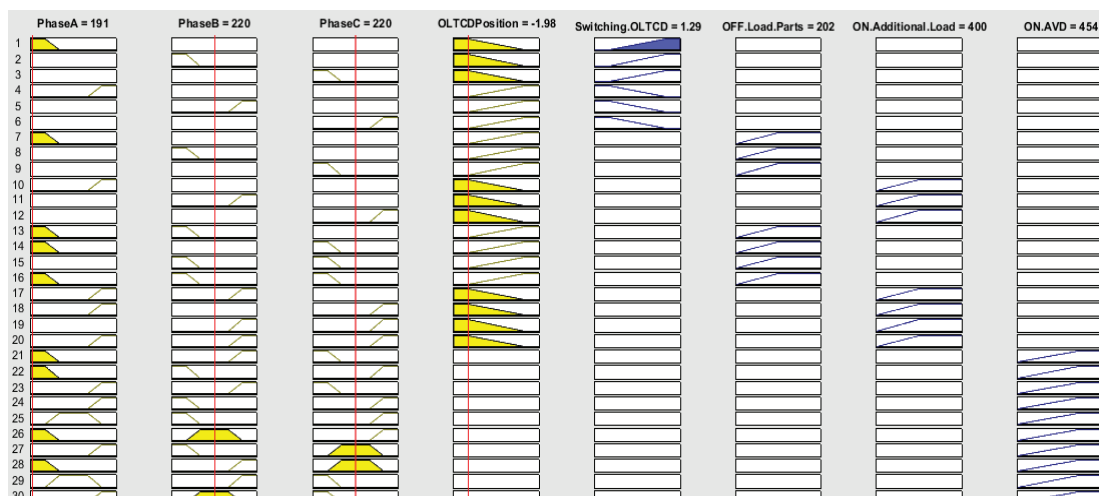


Рис. 5. Правило логічного висновку за зниження напруги однієї з трьох фаз, коли перемикач під навантаженням не на максимумі

Аналогічним чином розглянемо правило логічного висновку для нормалізації сталого відхилення напруги в одній із фаз «Фаза А», «Фаза В» або «Фаза С» (рис. 6), де напруга висока, а положення пристрою перемикача під навантаженням не встановлено на мінімум [16; 17]. Це правило в повному вигляді має такий вигляд: *if* (UAhigh and UBhigh and UChigh), а не OLTCDmin $\rightarrow$ OLTCD-.

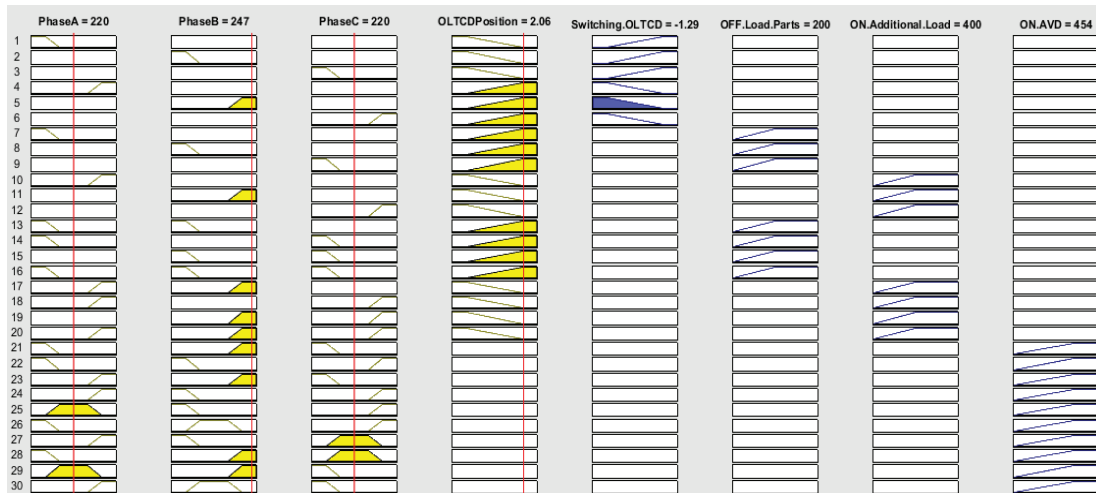


Рис. 6. Правило логічного висновку за підвищеної напруги однієї з трьох фаз, коли перемикач під навантаженням не на мінімумі

На рис. 6 у 5-му правилі значення «Фаза В» в положенні високої напруги, тобто «Фаза В» має значення 247 В, у наведених правилах логічного висновку виглядає як UBhigh, а в цей момент фази «Фаза А» і «Фаза С» відповідають номінальному значенню напруги 220В (UAmid, UCmid). «Положення пристрою перемикачання не встановлено в мінімальне положення» (OLTCDmin) і має значення 2,06, у зв'язку з чим розроблена система нечіткого виведення рекомендує перевести перемикач під навантаженням у положення 1.

Розглянемо такий випадок (рис. 7) у 7-му правилі, де за введених значень фаз «Фаза А» знаходиться в положенні низької напруги 192 В (UAlow), а в цей час «Фаза В» і «Фаза С» відповідають номінальному значенню напруги 220 В (UBmid, UCmid), а «Положення пристрою перемикачання під навантаженням» вже на максимумі (OLTCDmax), і має значення 2,48, а тому розроблена система нечіткого виведення рекомендує відключати частину навантаження до значення 245 кВт. Правило логічного висновку в повному вигляді має такий вигляд: *if* (UAlow and UBlow and UClow) і OLTCDmax $\rightarrow$ OFF. Parts of the Load (вимкнено частину навантаження).

Аналогічно розглянемо такий самий випадок (рис. 8) в 11-му правилі, де за введених значень фаз «Фаза В» знаходиться в положенні високої напруги 246 В (UBhigh), а в цей час «Фаза А» і «Фаза С» відповідають номінальному значенню напруги 220 В (UBmid, UCmid), а «Положення пристрою перемикачання» вже знаходиться на мінімальному рівні (OLTCDmin) і має значення -2,41, у зв'язку з чим розроблена система нечіткого вирахування рекомендує включати додаткове навантаження до значення 245 кВт. Правило логічного висновку в повному вигляді має такий вигляд: *if* (UAhigh and UBhigh and UChigh) і OLTCDmin $\rightarrow$ ON load (під навантаженням).

Наступний випадок на рис. 9 в 13-му правилі, де за введених значень фаз «Фаза А» знаходиться в положенні низької напруги 192 В (UAlow) і також «Фаза В» знаходиться в положенні низької напруги 195 В (UBlow), і в цей час «Фаза С» відповідає номінальному значенню

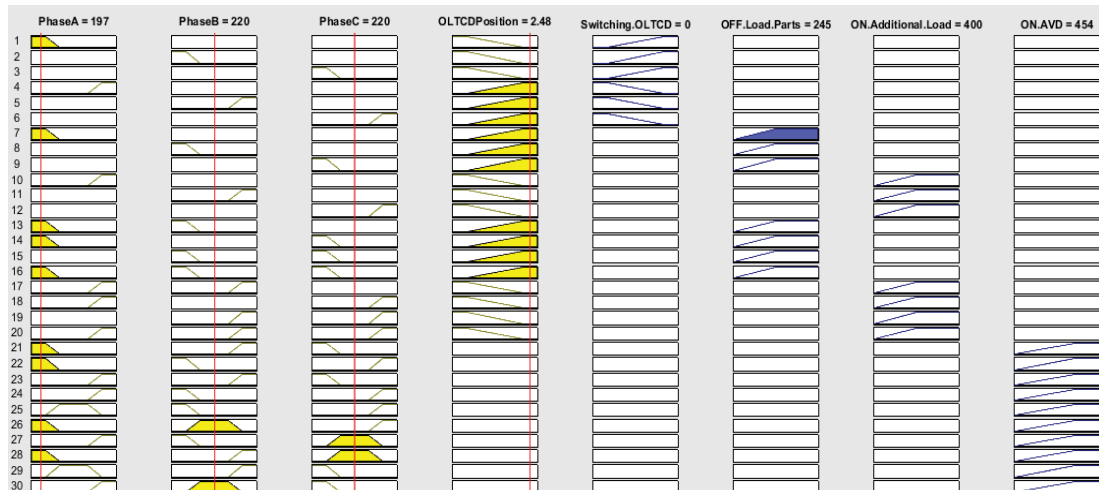


Рис. 7. Правило логічного висновку при зниженій напрузі однієї з трьох фаз при роботі перемикача на максимумі

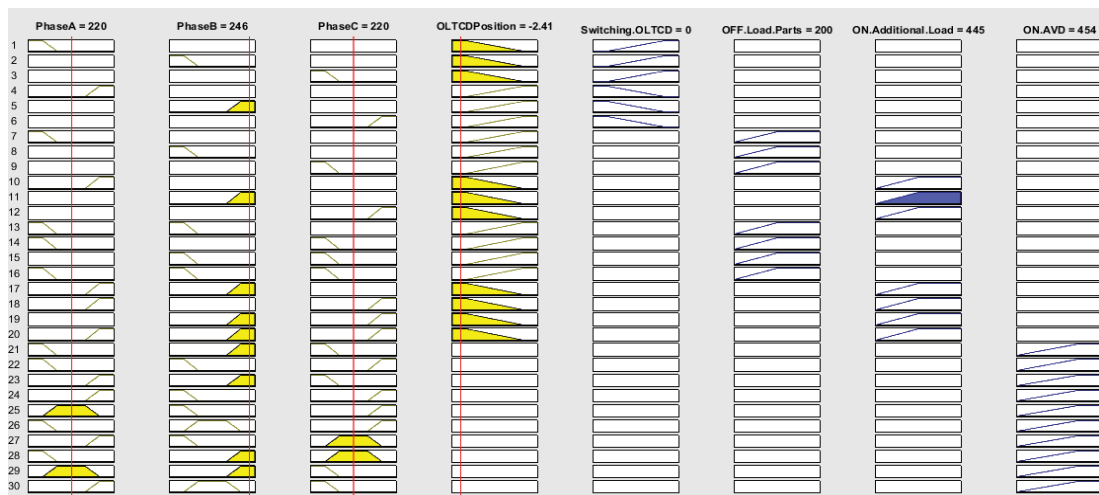


Рис. 8. Правило логічного висновку за підвищеної напруги однієї з трьох фаз під час роботи перемикача на мінімумі

напруги 220 В (U_{Cmid}), а «Положення пристрою перемикачання відгалужень» знаходиться вже на максимумі ($OLTC_{Dmax}$) і має значення 2,69, і тому розроблена система нечіткого вирахування рекомендує відключати частину навантаження до значення 245кВ. Правило логічного висновку в повному вигляді має такий вигляд: *if* (U_{Alow} and U_{Blow} and U_{Clow}) і (U_{Alow} and U_{Blow} and U_{Clow}) і $OLTC_{Dmax} \rightarrow$ OFF. Parts of the Load (вимкнено частину навантаження).

Наступний випадок на рис. 10 в 17-му правилі, де за введених значень фаз «Фаза А» знаходиться в положенні високої напруги 247 В (U_{Ahigh}), і також «Фаза В» знаходиться в положенні високої напруги 245 В (U_{Bhigh}), і в цей час «Фаза С» відповідає номінальному значенню напруги 220 В (U_{Cmid}), а «Положення пристрою перемикачання відгалужень» уже на мінімумі ($OLTC_{Dmin}$) і має значення -2,41, у зв'язку з чим розроблена система нечіткого вирахування рекомендує включати додаткове навантаження до значення 445 кВ. Правило логічного висновку в повному вигляді має такий вигляд: *if* (U_{Ahigh} and U_{Bhigh} and U_{Chigh}) і (U_{Ahigh} and U_{Bhigh} and U_{Chigh}) і $OLTC_{Dmin} \rightarrow$ ON load (під навантаженням).

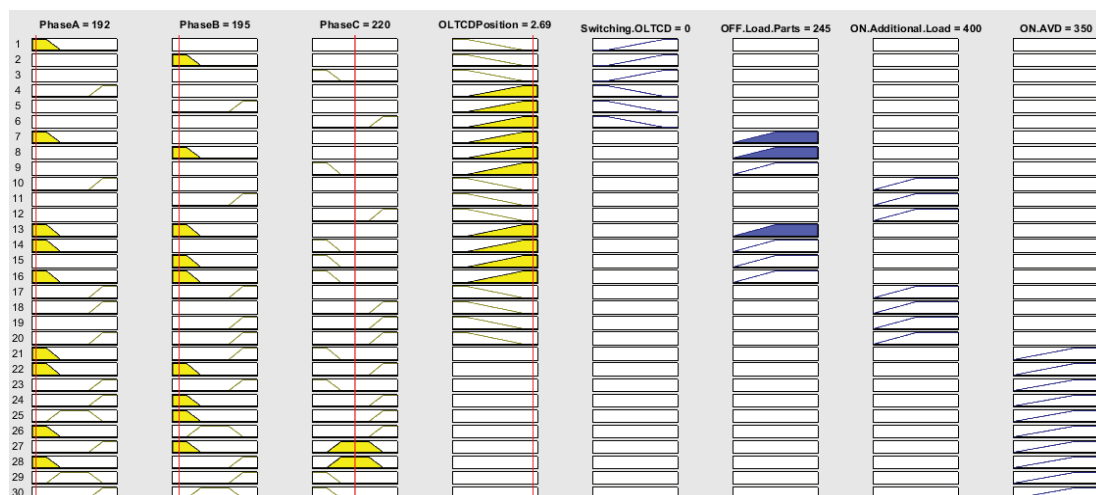


Рис. 9. Правило логічного висновку за зниженої напруги у двох фазах і однієї фази з номінальною напругою під час роботи перемикача у максимальному положенні

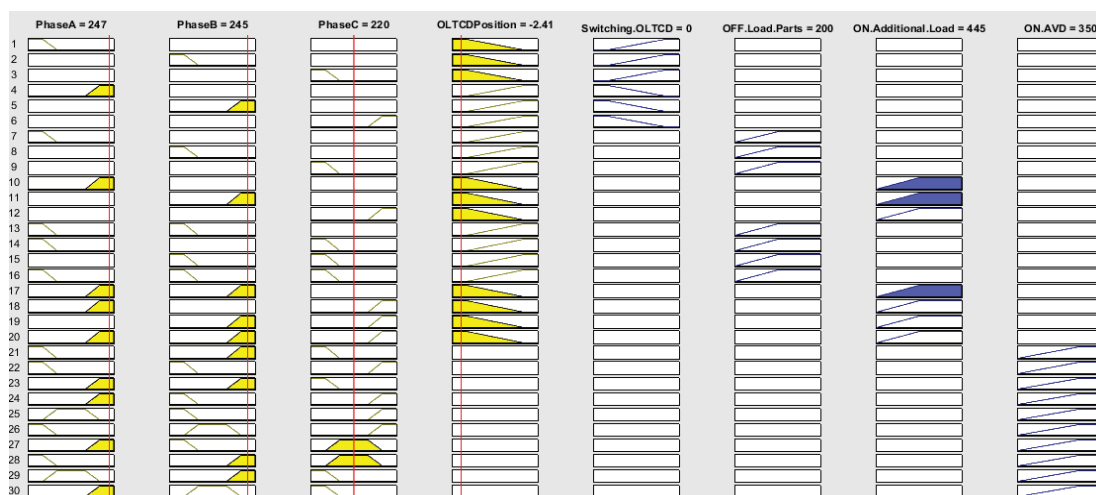


Рис. 10. Правило логічного висновку за підвищеної напруги у двох фазах і однієї фази з номінальною напругою під час роботи перемикача на мінімумі

На рис. 11 в 7-му, 8-му, 9-му, 13-му, 14-му, 15-му і 16-му правилах, де за введених значень фаз «Фаза А» знаходиться в положенні низької напруги 193 В ($U_{A\text{low}}$), «Фаза В» знаходиться в положенні низької напруги 195 В ($U_{B\text{low}}$), і «Фаза С» також знаходиться в положенні низької напруги 195 В ($U_{C\text{low}}$), і «Положення пристрою перемикачання» вже на максимумі ($OLTC_{D\text{max}}$) та має значення 2,41, у зв'язку з чим розроблена система нечіткого вирахування рекомендує відключати частину навантаження до значення 245 кВт. Правило логічного висновку в повному вигляді має такий вигляд: *if* $U_{A\text{low}}$ and $U_{B\text{low}}$ and $U_{C\text{low}}$ and $OLTC_{D\text{max}}$ → OFF. Parts of the Load (вимкнено частину навантаження).

Аналогічно, на рис. 12 у правилах 10-му, 11-му, 12-му, 17-му, 18-му, 19-му, 20-му, де за введених значень фаз «Фаза А» знаходиться в положенні високої напруги 246 В ($U_{A\text{high}}$), «Фаза В» знаходиться в положенні високої напруги 243 В ($U_{B\text{high}}$), і «Фаза С» також знаходиться в положенні високої напруги 240 В ($U_{C\text{high}}$), а «Положення пристрою перемикачання відгалужень» уже на мінімальному рівні ($OLTC_{D\text{min}}$) і має значення -2,55, у зв'язку з чим розроблена система нечіткого вирахування рекомендує включати додаткове навантаження до значення

445 кВ. Правило логічного висновку в повному вигляді має такий вигляд: *if*UAhigh *and* UBhigh *and* UChigh *and* OLTCDmin $\rightarrow$ ON (під навантаженням).

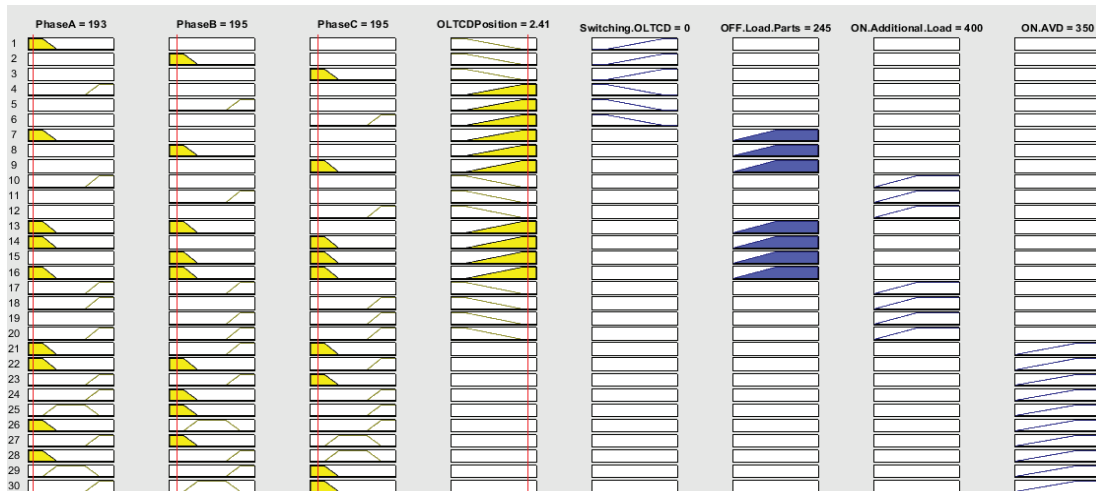


Рис. 11. Правило логічного висновку при зниженій напрузі трьох фаз одночасно і при роботі перемикача на максимумі

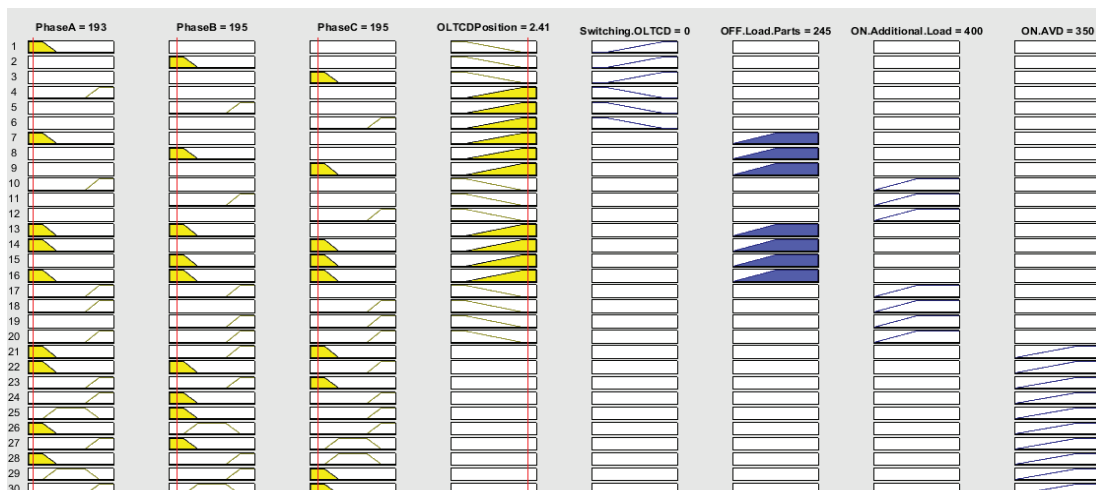


Рис. 12. Правило логічного висновку за підвищеної напруги трьох фаз одночасно і під час роботи перемикача на мінімумі

Графічний інтерфейс для перегляду нечіткої вихідної поверхні наведено на рис. 13, де видно, що за зміни напруги на одній з трьох фаз перемикач під навантаженням перейде в потрібне положення. За зміни напруги на двох фазах буде включатися додаткове навантаження або відключатися частина навантаження. А за зміни напруги на всіх трьох фазах буде включено пристрій додаткової напруги.

У деяких випадках за зміни напруги на двох або трьох фазах і спрацювання навантажувального пристрою пристрій додаткової напруги і додаткове навантаження включаються одночасно, але в деяких випадках частина навантаження відключається. Цей аналіз допомагає встановити точне регулювання напруги в одній фазі або на всіх трьох фазах мережі одночасно. Після варіювання значень вхідних змінних визначається адекватність даної розробленої нечіткої моделі. Дана модель ефективна тим, що команда управління може бути видана не за фактом

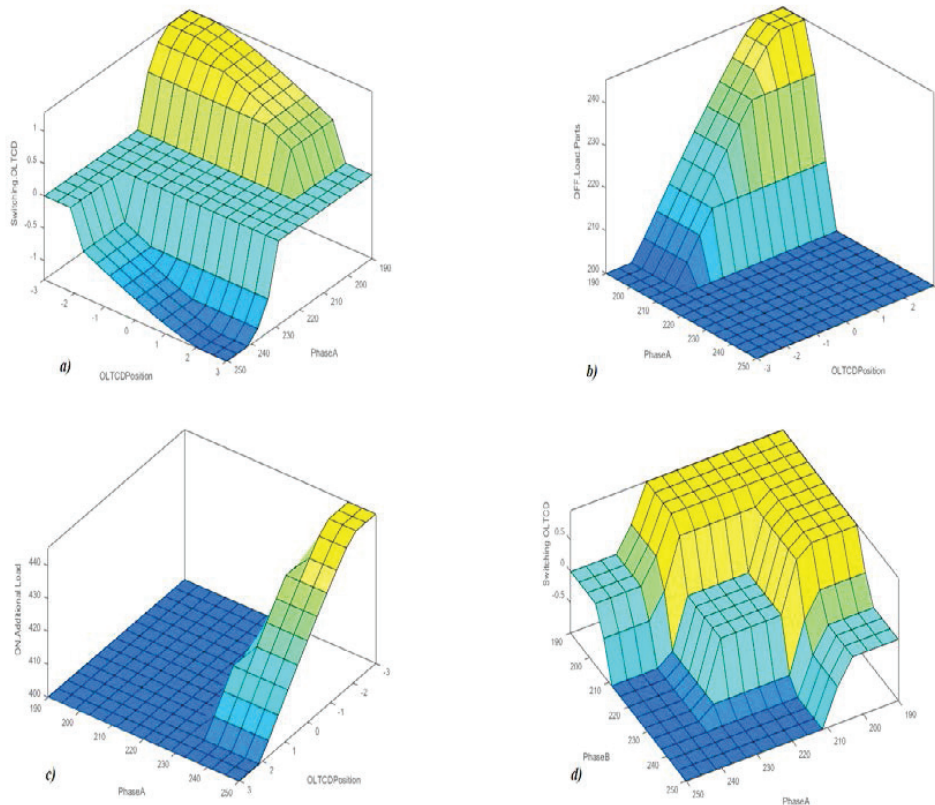


Рис. 13. Графічний інтерфейс для перегляду нечіткої вихідної поверхні для:
а) перемикавання пристроєм OLTC; б) відключення частини навантаження;
в) включення додаткового навантаження; г) включення пристрою «ПДН»

порушення норм відхилення напруги й якості електричної енергії, а заздалегідь, бо функції приналежності терм-множин перетинаються.

Висновки. Використання алгоритму управління, заснованого на нечіткій логіці, дає змогу підвищити ефективність пристрою перемикавання відгалужень і додаткових пристроїв напруги в регулюванні встановленого відхилення напруги порівняно з існуючими системами. Запропонований алгоритм досить простий у реалізації на програмованих логічних контролерах або нечітких контролерах, він може бути легко доповнений або змінений за адаптації до конкретних умов експлуатації.

Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні моделі регулювання показників якості електричної енергії на основі методу нечіткої логіки. Під час отримання моделей автоматизованого регулювання якості електричної енергії були застосовані методи обробки та аналізу даних, що дало змогу виводити і бачити вхідні та вихідні дані, місця втрат напруги в мережі, які впливають на якість електричної енергії, що дало можливість підвищити адекватність моделей регулювання якості енергоспоживання. Аналітично встановлено взаємозв'язок між ефективністю обробки та аналізу вхідних і вихідних даних та автоматизованим регулюванням якості споживання електроенергії, що дало змогу провести порівняльний аналіз моделей обробки та аналізу даних напруги в розподільчих мережах із моделями, отриманими іншими методами.

Практична значимість роботи полягає у побудові моделі з використанням методу нечіткої логіки, що дає змогу прискорити узгодження трансформатора з перемикачем зі схемою управ-

ліній і встановити більш точне регулювання напруги, що підвищить ККД трансформатора і самої системи; Результати роботи можуть бути використані під час проєктування підстанції для впровадження в енергосистему.

Перспектива подальших досліджень може бути спрямована на розроблення структурних і принципових схем управління трансформаторами і створення моделей для реалізації більш детальних цілочисельних розрахунків.

Список використаних джерел

1. Tesařová M. Power quality and quality of supply. *Proceedings of the Intensive Programme 2011*. 1st ed. Pilsen: University of West Bohemia. 2011. 95–101.
2. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги живлення в електричних мережах загального призначення. Замість ДСТУ EN 50160:2010; Вхідні дані 20.05.2014. Київ : Міністерство економічного розвитку України, 2014. 32 с.
3. Feng J. Evaluating Demand Response Impacts on Capacity Credit of Renewable Distributed Generation in Smart Distribution Systems. *IEEE Access*. 2018. 6. 14307–14317. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2745198>
4. Qawaqzeh M., Dudnikov S., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Trunova I., Pazyi V., Danylchenko D., Halko S. Buinyi, R. Development of algorithm for the operation of a combined power supply system with renewable sources. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2022. 1–4. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916372>
5. Fu H., Zhang X. Market Equilibrium in Active Distribution System With μ VPPs: A Coevolutionary Approach. *IEEE Access*. 2017. 5. 8194–8204. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2691316>
6. Zhou Y., Mancarella P., Mutale J. Framework for capacity credit assessment of electrical energy storage and demand response. *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2016. 10(9). 2267–2276. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0458>
7. Qawaqzeh M., Al_Issa H.A., Buinyi R., Bezruchko V., Dikhtyaruk I., Miroshnyk O., Nitsenko V. The assess reduction of the expected energy not-supplied to consumers in medium voltage distribution systems after installing a sectionalizer in optimal place. *Energy, Grids and Networks*. 2023. 34. 101035. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101035>
8. Assad U., Hassan M.A.S., Farooq U., Kabir A., Khan M.Z., Bukhari S.S.H., Jaffri Z.A., Oláh J., Popp J. Smart grid, Demand Response and Optimization: A Critical Review of Computational Methods. *Energies*. 2022. 15. 2003. <https://doi.org/10.3390/en15062003>
9. Perninge M., Soder L. A Stochastic Control Approach to Manage Operational Risk in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2012. 27(2). 1021–1031. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2174165>
10. Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. Mathematical modelling of cogeneration photoelectric module parameters for hybrid solar charging power stations of electric vehicles. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2022. 1–6. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397>
11. Al-Quraan T.M.A., Vovk O., Halko S., Kvitka S., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V., Zayed N.M., Islam A. Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear. *Inventions*, 2022, 7(4), 92. <https://doi.org/10.3390/inventions7040092>
12. Samadi P. Advanced Demand Side Management for the Future Smart Grid Using Mechanism Design. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. 3. 1170–1180. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2203341>
13. Al-Issa H.A., Qawaqzeh M., Kurashkin S., Halko S., Kvitka S., Vovk O., Miroshnyk O. Monitoring of power transformers using thermal model and permission time of overload. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022. 12(3). 2323–2334. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2323-2334>
14. Bondarenko L., Halko S., Matsulevych O., Tetervak I., Vershkov O., Miroshnyk O., Nitsenko V., Havrysh V. The Experimental Research on Unit Operation for Fruit Crops' Bones Calibration. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023. 13(1). 21. <https://doi.org/10.3390/app13010021>
15. Suslov K., Solonina N., Gerasimov D. Assessment of an impact of power supply participants on power quality. *18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Ljubljana, Slovenia. 2018. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378836>

16. Komada P., Trunova I., Miroshnyk O., Savchenko O., Shchur T. The incentive scheme for maintaining or improving power supply quality. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2019. 95(5). 79–82. <https://doi.org/10.15199/48.2019.05.20>
17. Alghamdi B. Fuzzy Logic–Based Decentralized Voltage–Frequency Control and Inertia Control of a VSG–Based Isolated Microgrid System. *Energies*. 2022. 15. 8401. <https://doi.org/10.3390/en15228401>.
18. Tymchuk S., Miroshnyk O. Assess electricity quality by means of fuzzy generalized index. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. 3/4. 75. 26–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42484>
19. Farrokhhabadi M., Simpson-Porco J.W., Cañizares C.A. Optimal Design of Voltage-Frequency Controllers for Microgrids. *IEEE Madrid PowerTech*, Madrid, Spain. 2021. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PowerTech46648.2021.9495073>
20. Miroshnyk O.O., Tymchuk S.O. Uniform distribution of loads in the electric system 0.38/0.22 kV using genetic algorithms. *Technical Electrodynamics*. 2013. 4. 67–73. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84885913005&partnerID=MN8TOARS>
21. Shao K., Zheng J., Tang R., Li X., Man Z., Liang B. Barrier function based adaptive sliding mode control for uncertain systems with input saturation. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*. 2022. 27. 4258–4268.
22. Tymchuk S., Shendryk S., Shendryk V., Panov A., Kazlauskaitė A., Levytska T. Decision-Making Model at the Management of Hybrid Power Grid. In: Lopata A., Butkienė R., Gudonienė D., Sukackė V. (eds) *Information and Software Technologies. ICIST 2020. Communications in Computer and Information Science*. 2020. 1283. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59506-7_6
23. Rubanenko O. Hydroelectric Power Generation for Compensation Instability of Non-guaranteed Power Plants. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey. 2020. 52–56. <https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263151>
24. Trunova I., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Pazyi V., Sereda A., Halko S., Buinyi R. The substantiation of reconstruction of power distribution networks objects. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 126–131. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570107>
25. Verrelli C.M., Tomei P. Adaptive learning control for nonlinear systems: A single learning estimation scheme is enough. *Automatica*. 2023. 149. 110833.
26. Panov A.A., Tymchuk S.A. Fuzzy algorithm for regulation of steady-state voltage deviation in the 0.4 kV electrical network. *United Journa*, Tallinn. 2019. 26. 31–37.
27. Castro J.R., Saad M., Lefebvre S., Asber D., Lenoiret L. Coordinated Voltage Control in Distribution Network with the Presence of DGs and Variable Loads Using Pareto and Fuzzy Logic. *Energies*. 2016. 9. 107. <https://doi.org/10.3390/en9020107>
28. Li Y. Command filter-based adaptive neural finite-time control for stochastic nonlinear systems with time-varying full-state constraints and asymmetric input saturation. *Syst. Sci.* 2022. 53. 199–221.
29. Lezhenkin O., Halko S., Miroshnyk O., Vershkov O., Lezhenkin I., Suprun O., Shchur T., Kruszelnicka W., Kasner R. Investigation of the separation of combed heap of winter wheat. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1781. 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012016>
30. Tabor S., Lezhenkin A., Halko S., Miroshnik A., Kovalyshyn S., Vershkov A., Hryhorenko O. Mathematical simulation of separating work tool technological process. *E3S Web of Conferences*. 2019. 132. 01025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913201025>
31. Al_Issa, H.A., Qawaqzeh M., Khasawneh A., Buinyi R., Bezruchko V., Miroshnyk O. Correct Cross-Section of Cable Screen in a Medium Voltage Collector Network with Isolated Neutral of a Wind Power Plant. *Energies*. 2021. 14. 3026. <https://doi.org/10.3390/en14113026>
32. Luo R., Zhang L., Li Y. Adaptive Fuzzy Fixed-Time Control for Uncertain Nonlinear Systems with Mismatched Disturbances. *Symmetry*. 2024. 16(5). 560. <https://doi.org/10.3390/sym16050560>
33. Панов А.О. Розроблення алгоритму регулювання сталого відхилення напруги в розподільчих мережах 0,4–10 кВ. Всеукр. наук.-практ. конф. випускників вищих навчальних закладів та молодих вчених. Харків : ХНАДУ, 2021. 170–174.
34. Qawaqzeh M., Miroshnyk O., Shchur T., Kasner R., Idzikowski A., Kruszelnicka W., Tomporowski A., Bałdowska-Witos P., Flizikowski J., Zawada M., Doerffer K. Research of Emergency Modes of Wind Power Plants Using Computer Simulation. *Energies*. 2021. 14(16). 4780. <https://doi.org/10.3390/en14164780>



35. Панов А.О., Тимчук С.О. Модель регулювання показників якості електроенергії в розподільчих мережах 0,4–10 кВ. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2023. № 2. 13–23. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2023.275897>
36. Belman-Flores J.M., Hernández-Fusilier D., García-Pabón J.J., Rodríguez-Valderrama D.A. Intelligent Control Based on Usage Habits in a Domestic Refrigerator with Variable Speed Compressor for Energy-Saving. *Clean Technologies*. 2024. 6(2). 528–550. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6020028>
37. Trunova I., Miroshnyk O., Savchenko O., Moroz O. The perfection of motivational model for improvement of power supply quality with using the one-way analysis of variance. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. 6. 163–168. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/24>
38. Bazaluk O., Struchaiev N., Halko S., Miroshnyk O., Bondarenko L., Karaiev O., Nitsenko V. Ways to improve the efficiency of devices for freezing of small products. *Materials*. 2022. 15(7). 2412. <https://doi.org/10.3390/ma15072412>
39. Panov A., Tymchuk S. Fuzzy algorithm for regulation of reverse and zero sequence voltage asymmetry coefficients. *4th Int. Sci. and Pract. Conf. Perspectives of world science and education*, Japan: CPN Publishing Group. 2019). 670–679.
40. Khasawneh A., Qawaqzeh M., Kuchanskyy V., Rubanenko O., Miroshnyk O., Shchur T., Drechny M. Optimal Determination Method of the Transposition Steps of an Extra-High Voltage Power Transmission Line. *Energies*. 2021. 14(20). 6791. <https://doi.org/10.3390/en14206791>
41. Vovk O., Kvitka S., Halko S., Strebkov O. Energy-saving control of asynchronous electric motors of driving working machines. *Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations*. Cham: Springer International Publishing. 2019. 415–423. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_43
42. Wu J., Cui P. Cooperative Adaptive Fuzzy Control for the Synchronization of Nonlinear Multi-Agent Systems under Input Saturation. *Mathematics*. 12(10). (2024). 1426. <https://doi.org/10.3390/math12101426>
43. Chen C.L.P., Ren C.E., Du T. Fuzzy observed-based adaptive consensus tracking control for second-order multiagent systems with heterogeneous nonlinear dynamics. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 2015. 24. 906–915.

Стаття надійшла до редакції 06.04.2025

K. Demchenko¹, O. Piskarev², A. Panov¹, S. Halko³, A. Sereda¹

¹State Biotechnological University

²Kharkiv National University of Radio Electronics

³Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University

MAINTAINING THE QUALITY OF ELECTRICITY FOR CONSUMERS WITH THE HELP OF FUZZY LOGIC

Summary

In accordance with the Energy Strategy of Ukraine in the period up to 2030, among the directions for increasing the efficiency of the country's energy sector, the control of the quality of electricity for consumers and the regulation of voltage and indicators of the quality of electricity to achieve quality standards have been announced. It is known that in the sockets of the population of Ukraine there can be any voltage, and not the promised 220 Volt. Control of this power quality indicator should be performed by the supplier. Why does it turn out that the electric current becomes of poor quality and leads to emergency consequences. The reasons are many and can be various, and in this most often, but not to blame, the companies that supply electricity are to blame. Drops in network voltage, which can cause any consumer equipment to burn out. Power outages are an unpredictable phenomenon, they have existed and will always exist, as they depend on natural factors. However, voltage drops in the network can be regulated in the future, and consumers will be able to receive high-quality electricity. As a result of the load change, the voltage loss in the network also changes, and as a result, the voltage at the consumers' terminals changes. These changes can be fast and short-term (for example, during the start of an asynchronous motor with a short-circuited rotor) or slow and long-lasting (with a gradual change in load over the course of a day or year and with smooth voltage regulation).



Therefore, a model of regulation of steady-state voltage deviation using fuzzy logic was proposed for the problem of normalizing voltage quality in the network. And on the basis of simulation, the effectiveness of the proposed algorithms is shown. A control algorithm based on fuzzy logic is considered as an alternative to the transition from analog control to a digital on-load tap-changer control system. Modeling of this system was carried out in the Fuzzy Logic Toolbox, included in the MATLAB package. Four fuzzy variables corresponding to phase voltages are considered as input parameters of the fuzzy output system: «Phase A», «Phase B», «Phase C» and «On-load tap-changer position», and four fuzzy variables are considered as output parameters: «Device switching», «On-load tap-changer», «Disconnecting part of the load», «Switching on an additional load» and «Switching on the additional voltage device». The results of this work can be used by electricity supply companies or individual users who plan to normalize the voltage quality in their electrical network.

Keywords: distribution network, control algorithm, time sets, power quality, additional load.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-3>

УДК 621.3

І. Т. Карпалюк¹, професорВ. М. Баженов², доцентМ. М. Одегов³О. О. Горюн², аспірант

ORCID: 0000-0002-5634-6807

ORCID: 0009-0001-5450-8382

ORCID: 0000-0003-3967-9009

ORCID: 0009-0002-5235-6853

¹Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»³Український державний університет залізничного транспорту

e-mail: humpway@gmail.com

ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ МІСЦЕВИХ ЛІНІЙ

Анотація. У роботі розглянуто особливості функціонування релейного захисту високовольтних ліній 110–220 кВ в умовах дефіциту генеруючої потужності та струму короткого замикання, що характерне для автономних локальних енергосистем у періоди надзвичайних ситуацій, зокрема у воєнний час. Проведено аналіз умов спрацювання резервних струмових та дистанційних захистів ліній у нестандартних режимах роботи енергосистеми. Запропоновано рекомендації щодо вибору уставок, забезпечення селективності, чутливості та надійності спрацювання захистів за мінливих потоків потужності. Установлено, що ефективність резервного захисту суттєво знижується зі зменшенням потужності системи, особливо за живлення з боку слабких джерел. Обґрунтовано доцільність застосування додаткових захисних заходів, таких як селективна струмова відсічка з витримкою часу та використання АПВ із блокуванням.

Ключові слова: релейний захист, дефіцит потужності, слабкі джерела живлення, ефективність резервного захисту, чутливість захисту, надійність спрацювання, максимальна струмова відсічка, селективна струмова відсічка, автоматичне повторне включення.

Постановка проблеми. В час для надійного електропостачання особисте значення приймає високовольтні лінії 110–220 кВ, котрі виконують функції міжсистемних зв'язків, а в подальшому функції основних високовольтних ліній електропередачі для автономних місцевих енергосистем. Основні труднощі для захисту даних ліній від пошкоджень є налаштування параметрів спрацювання часто мінливих режимів живлючої мережи.

Мета роботи полягає в підвищенні ефективності сучасних пристроїв резервних захистів місцевих ліній електропередачі в умовах дефіциту генеруючої потужності та потужності короткого замикання

Матеріали дослідження. Дослідження ефективності релейного захисту виконується на прикладі високовольтної лінії 110 кВ для електропостачання 2-х трансформаторної підстанції 110/35/6 кВ.

Проаналізуємо рекомендовані [1, 2, 3] умови функціонування та вибору резервних струмових захистів лінії (рис. 1). Згідно загальних правил перша умова функціонування максимальної струмової відсічки (МСВ) від між фазних КЗ, як абсолютно селективного захисту, – це не спрацювання від КЗ в кінці лінії, в точці К1 в максимальному режиму живлючої мережи ПСА, в зоні захисту трансформаторів підстанції ПСБ:

$$I_{сз} \geq K_{від} \cdot I_{\max K1}^{(3)},$$

де $K_{від}$ – коефіцієнт відведення в межах 1,2–1,5, $I_{\max K1}^{(3)}$ – струм КЗ в максимальному режиму.

Друга умова функціонування: відсічка повинна бути відведення від кидка струму намагнічування $I_{\text{нам}}$ при включенні ненавантаженого трансформатора підстанції ПСБ під напругу:

$$I_{\text{сз}} \geq K_{\text{від}} \cdot I_{\text{нам}},$$

$$\text{де } I_{\text{нам}} = 7 \cdot I_{\text{ном}} \text{ та } I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{(\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}})}.$$

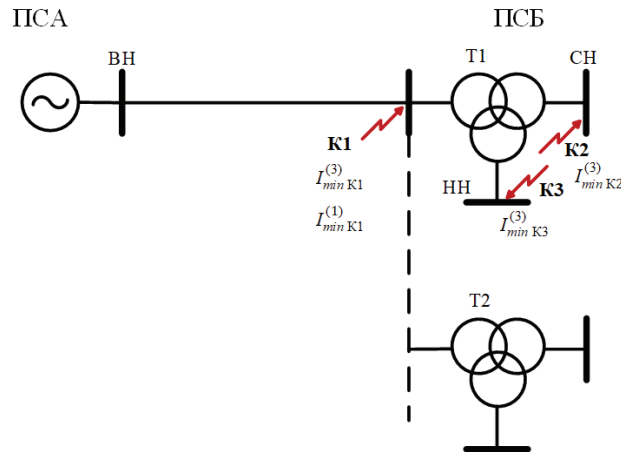


Рис. 1. Вихідні дані до струмових захистів

Струмова відсічка перевіряється по чутливості до 2-х фазного КЗ наприкінці лінії в мінімальному режимі:

$$K_{\text{ч}} = I_{\text{мин K1}}^{(2)} / I_{\text{сз}} = I_{\text{мин K1}}^{(3)} \cdot 0,867 / I_{\text{сз}}.$$

Згідно ПУЕ: $K_{\text{ч}} \geq 1,5 \div 2$.

Зону дії струмової відсічки $Z_{\text{св}}\%$ пропонуємо визначати по опору спрацювання СВ:

$$Z_{\text{сз}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{сз}}},$$

$$Z_{\text{св}} \% = (Z_{\text{сз}} - Z_{\text{C min}}) \cdot 100 / Z_{\text{л}},$$

де $Z_{\text{C min}}$ – опір живлючої системи в мінімальному режиму роботи; $Z_{\text{л}}$ – опір лінії, що захищається.

Ефективність струмової відсічки визначаємо шляхом порівняння $Z_{\text{C min}}$ з $Z_{\text{л}}$ по табл. 1.

$$K_{\text{C}} = Z_{\text{C min}} / Z_{\text{л}}.$$

Таблиця 1

Вплив параметрів живлючої системи на ефективність захисту лінії

Z_{Cmax} Ом	$Z_{\text{л}}$, Ом	K_{C}	$Z_{\text{св}} \%$	$S_{\text{ном, с}}$, МВт	$Z_{\text{C min}}$, Ом	$Z_{\text{сз}}$, Ом
1	5	0,1	82	2645	0,5	4,6
		0,2 = Z_{Cmax}	72	1322	1	
		0,4	52	661	2	
		0,8	12	330	4	
		0,92 = $Z_{\text{сз}}$	0	287 (3,5 $S_{\text{ПС}}$)	4,6	

Розрахункові дослідження показали, що якщо опір живлючої системи збільшується до опору спрацювання струмової відсічки, то вона не захищає лінію від пошкодження. Тому у таких випад-

ках рекомендуємо застосувати додатково струмову відсічку з затримкою часу 0,5 с зі с зоною дії в межах захисту трансформатора підстанції. Для виправлення неселективної роботи використовувати АПВ по спрацюванню захисту с блокуванням від диференційного захисту трансформатора:

$$I_{c3} \geq 1,3 \cdot I_{\max K2}^{(3)},$$

де $I_{\max K2}^{(3)}$ – струм короткого замикання за трансформатором в максимальному режимі.

Максимальний струмовий захист зі затримкою часу також залежить від часто мінливих режимів живлючої мережі [5, 6, 7]. Перша умова функціонування для максимального струмового захисту (МСЗ) [4] від між фазних КЗ – це відведення від струму навантаження:

$$I_{c3} = 1,2 \cdot I_{\text{нав}}.$$

Ефективність МСЗ забезпечується за рахунок резервування захистів трансформаторів підстанції:

$$I_{c3} = I_{\min K3}^{(2)} / 1,3(1,2),$$

де $I_{\min K3}^{(2)}$ – 2-х фазний струм КЗ за трансформатором в мінімальному режимі.

МСЗ перевіряється по чутливості до 2-х фазного КЗ наприкінці лінії в мінімальному режимі:

$$K_{\text{ч}} \geq I_{\min K1}^{(2)} / I_{c3}.$$

Згідно ПУЕ: $K_{\text{ч}} \geq 1,2$.

Уставка часу спрацювання МСЗ для виключення неселективної роботи обирається рівною часу спрацювання останньої зони дистанційного захисту.

Струмова відсічка захисту нульової послідовності (СЗНП) від між фазних КЗ зобов'язана захищати всю лінію:

$$I_{c3} = I_{\min K1}^{(1)} / K_{\text{ч}},$$

де: $K_{\text{ч}} = 1,5 \div 2$ – коефіцієнт чутливості; $I_{\min K1}^{(1)}$ – мінімальний режим КЗ наприкінці лінії.

Для 2 ступені СЗНП це умова відведення від струму небалансу в нульовому дроті трансформатору струму при зовнішніх КЗ між фазами:

$$I_{c3} = 1,5 \cdot 0,1 \cdot I_{\max K2}^{(3)},$$

де: $I_{\max K2}^{(3)}$ – розраховується при включеній нейтралі трансформатора з меншим опором.

Уставка часу спрацювання СЗНП обирається: відсічка (1 ступінь) $t_{c3} = 0,1$ с.; 2 ступінь $T_{c3} = 1$ с.

Згідно аналізу функціонування струмових захистів на рисунку 1 приведені ті параметри які впливають на ефективність релейного захисту лінії в умовах дефіциту генеруючої потужності та потужності короткого замикання.

По теорії ефективність дистанційного захисту (ДЗ) лінії не залежить від режимів роботи живлячої енергосистеми [5, 7]. Розглянемо це затвердження. Дистанційна відсічка (1 зона) повинна бути відведення від захистів підстанції (рис. 2):

$$Z_{c31} \leq 0,85 \cdot Z_{\text{л}},$$

$$\text{де } Z_{\text{л}} = \sqrt{(r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2)}.$$

Чутливість дистанційного захисту перевіряється по струму точної роботи. $I_{\text{тр}}$.

$$K_{\text{ч}} = I_{\min K1}^{(2)} / I_{\text{тр}} \geq 1,3.$$

З метою збільшення ефективності дистанційного захисту лінії пропонується налаштовувати уставку на захист всій лінії:

$$Z_{c31} \geq 2 \cdot Z_{\text{л}}.$$

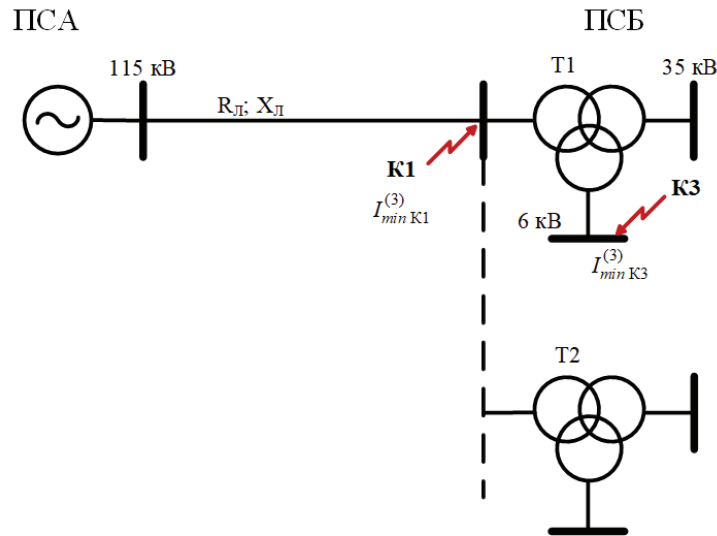


Рис. 2. Вихідні дані до дистанційних захистів

Для виправлення неселективної роботи пропонується використовувати АПВ с блокуванням від диференційного захисту трансформатора [5, 6].

Вихідні дані трансформаторів підстанції для подальших розрахунків дистанційних захистів: $S_{ном}$ – потужність трансформатора, МВА, в.о; ΔU – межа РПН трансформатора; $U_{кВ-Н}$, $U_{кВ-С}$, $U_{кС-Н}$ – напруги КЗ по обмоткам трансформатора, %. Далі розрахунки параметрів трансформатора для уставок дистанційних захистів.

Напруги КЗ:

$$U_B \% = 0,5 (U_{кВ-С} + U_{кВ-Н} - U_{кС-Н}),$$

$$U_C \% = 0,5 (U_{кВ-С} + U_{кС-Н} - U_{кВ-Н}),$$

$$U_H \% = 0,5 (U_{кВ-Н} + U_{кС-Н} - U_{кВ-С}).$$

Опорі кожної обмотки розраховуються по формулі:

$$Z = U \% \cdot U_{ном}^2 / (100 \cdot S_{ном}).$$

Для II зони – це умова відведення від КЗ на шинах СН трансформатора:

$$Z_{сз 2} \leq 0,85 \cdot (Z_{л} + Z_{тр.с РПН}).$$

$$Z_{тр.с РПН} = (Z_B + Z_C) \cdot (1 - \Delta U)^2.$$

II зона – це дистанційна відсічка зі затримкою часу:

$$T_2 = T_1 + \Delta t = 0 + 0,5 = 0,5 \text{ с.}$$

Перевіряється чутливість по струму точної роботи:

$$K_{ч} = I_{мин}^{(2)} / I_{тр} \geq 1,3.$$

В ПМ РЗА Діамант характеристики спрацювання I та II зони мають форму чотирикутника з можливістю зміщення на будь-який квадрант щодо початку координат. Вершини розраховуються за допомогою програмного забезпечення по параметрам спрацювання ($Z_{уст}$, $\varphi_{мч}$). Вхідні ланцюги 1-ої і 2-ої зони проходять через блокування від колихань. Для блокування при хитаннях в Діаманті використовується принцип вимірювання швидкості входження вектору опору до зони. Для блокованого ступеня: ширина – 1 Ом втор., час руху – 0,04 с.

Для III зони – це умова надійного захисту лінії:

$$Z_{сз3} \geq 1,5 \cdot Z_{л}.$$

Також умова резервування трансформаторів:

$$Z_{сз3} \geq 1,2 \cdot (Z_{л} + X_{тр.с РПН}),$$

$$X_{тр.с РПН} = (X_B + X_H) \cdot (1 + \Delta U)^2.$$

Наступна умова відведення від струму навантаження при знижені робочої напруги менше ніж номінальної.

$$Z_{сз3} \leq U_{\min} / (K_{\text{від}} \cdot K_{\text{пов}} \cdot \sqrt{3} \cdot K_{\text{зап}} \cdot I_{\text{нав}} \cdot \cos(\varphi_{\text{мч}} - \varphi_{\text{н}})),$$

де: $U_{\min} = 0,8$; $K_{\text{від}} = 1,2$; $K_{\text{пов}} = 1,05$; $K_{\text{зап}} = 1$; $\varphi_{\text{мч}} = 65^\circ$; $\varphi_{\text{н}} = 30^\circ$.

Час спрацювання 3 ступені захисту:

$$T_3 = T_{2\max} + \Delta t,$$

де: $T_{2\max}$ – максимальний час захисту трансформатора ПС Б.

Перевіряється чутливість по струму точної роботи $I_{\text{тр}}$.

$$K_{\text{ч}} = I_{\min K3}^{(2)} / I_{\text{тр}} \geq 1,3.$$

В ПМ РЗА Діамант характеристики спрацьовування III зони мають форму трикутника з можливістю зміщення на будь-який квадрант щодо початку координат. Вершина z_3 розташована на початку координат, сторона z_2 , z_3 має нахил до осі R 115° , а сторона z_1 , z_3 нахил 47° .

Як і раніше, аналіз функціонування дистанційних захистів дає висновок, що на рисунку 2 показані ті вихідні параметри які визначають ефективність релейного захисту лінії в умовах дефіциту генеруючої потужності та потужності короткого замикання.

Висновки: Розглянуті особливості функціонування резервних захистів ліній електропередачі дозволили нам визначити вплив непередбаченої зміни режиму роботи електричної системи живлення в умовах дефіциту потужності енергопостачання на ефективність їх роботи. Вся суть у тому, що вибір уставок захистів виконується на вимогу їхньої селективної роботи із суміжними захистами в максимальних режимах роботи живильної енергосистеми. А ефективність резервних захистів потрібна у мінімальних режимах роботи енергосистеми, наприклад, при вимушеному виході з ладу багатьох ліній та трансформаторів. Виходячи з цього в роботі дана методика улаштування резервних захистів місцевих ліній енергосистем з метою підвищення їх ефективності в умовах війни.

Список використаних джерел

- 1 Правила улаштування електроустановок. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
- 2 Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013. – 533 с.
- 3 Релейний захист електроенергетичних систем. Підручник для студентів зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Є.І. Сокол, Г.А. Сендерович, О.Г. Гриб, В.М. Баженов та ін. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2020. – 306 с.
- 4 Перехідні процеси в системах електропостачання/ [Півняк Г.Г., Винославський В.М., Рибалко А.Я., Несен Л.І.]; за ред. академіка НАН України Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2002. – 597 с.
- 5 Релейний захист і автоматика: навч. посібник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, В. М. Баженов та ін.; за ред. В. М. Баженова. – Харків :УкрДУЗТ, 2020. – Ч. 1. – 250 с.
- 6 Яндульський О. С. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем [Електронне видання] : навч. посіб. О. С. Яндульський,



О. О. Дмитренко; під загальною редакцією д.т.н. О. С. Яндутьського. – К. : НТУУ «КПІ», 2016. – 102 с.

7 М. Bini, R. Abboud, P. Lima, and F. Lollo, Challenges and solutions in the protection of transmission lines connecting nonconventional power sources, 48th Annual Western Protective Relay Conference, 2021. – 16 p.

Стаття надійшла до редакції 28.04.2025р.

I. Karpaliuk¹, V. Bajenov², M. Odiehov³, O. Horiun²

¹*The Institute of Energy of National Academy of Sciences of Ukraine*

²*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*

³*Ukrainian State University of Railway Transport*

EFFICIENCY OF RELAY PROTECTION FOR LOCAL POWER TRANSMISSION LINES

Summary

The paper investigates the specific features of relay protection operation for high-voltage power transmission lines rated at 110–220 kV under conditions of limited generation capacity and reduced short-circuit current levels. Such conditions typically arise in autonomous or isolated local power systems operating during emergencies, particularly in wartime or following major accidents that result in the loss of connection with the main power grid. The study analyzes the impact of non-standard operating modes on the performance of backup overcurrent and distance protection schemes, identifying potential errors in relay behavior under weak infeed conditions. Examples of selectivity violations, sensitivity loss, and reduced reliability of protection devices due to significantly lower fault currents are presented. It is shown that traditional protection settings and coordination methods do not ensure effective operation in isolated system scenarios. Approaches to improve the settings of overcurrent and distance protection are proposed, taking into account the reduced capacity of power supply sources. The paper discusses the feasibility of implementing additional technical solutions such as time-delayed selective overcurrent protection, adaptive auto-reclosing blocking, and the use of information from automated control systems to enhance protection performance. The results of this study can be applied in the design, modernization, and operation of relay protection systems in local power networks..

Keywords: relay protection, power deficit, weak power sources, efficiency of backup protection, protection sensitivity, operating reliability, instantaneous overcurrent protection, selective overcurrent protection, automatic reclosing.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-4>

УДК 620.9, 621.3

Є. О. Кауркін, аспірант

ORCID: 0000-0002-5878-128X

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

e-mail: yevgenkaurkin141@gmail.com

НИЗЬКА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ ТЕПЛОПОСТАЧАЮЧОГО ПІДПРИЄМСТВА

У статті проаналізовано критичний рівень зношеності електроенергетичного обладнання України, зокрема АЕС, ГЕС та систем передачі електроенергії. Установлено, що значна частина обладнання експлуатується за межами нормативного строку служби, а сучасні умови воєнного часу ускладнюють підтримання якісного електропостачання. Окрему увагу приділено насосному обладнанню теплопостачальних підприємств, яке є уразливим до показників якості електроенергії. Асинхронні електродвигуни, що приводять у дію насоси, чутливі до напругових провалів, відхилень і гармонік. Проведено аналіз реальних вимірювань електричних параметрів на підстанціях, що живлять насосне обладнання, та виявлено низку негативних чинників, що впливають на надійність його роботи.

Ключові слова: параметри якості електричної енергії, асинхронні двигуни, втрати електричної енергії, несиметрія напруг за нульовою послідовністю, відхилення середньої напруги прямої послідовності, коефіцієнт n -ї гармонічного складника напруги, надійність роботи.

Постановка проблеми. Одна з проблем сучасних реалій електричного комплексу України – це стан зношеності обладнання. Ліміти з використання обладнання встановлені [1]. Залишковий ресурс устаткування визначають за організаційно-методичними документами. Фактичну величину ресурсу підтверджують відповідними засобами вимірювальної техніки [2]. Коли граничний строк експлуатації устаткування закінчується, уповноважена організація розробляє регламент технічних оглядів на продовжуваний строк безпечної експлуатації. Його зберігають разом із паспортом устаткування [2 п. 17]. Порядок оцінки технічного стану будівель і споруд визначає [3]. Сьогодні зношеність електроенергетичного обладнання значна. Так, наприклад, дані по атомних станціях України за джерелом [4].

Серед 15 діючих енергоблоків АЕС України вже подовжено термін експлуатації для шести блоків:

- РАЕС №№ 1, 2 – 10.12.2010 подовжено термін експлуатації до 2030, 2031 рр. відповідно;
- ЮУАЕС № 1 – 28.11.2013 подовжено термін експлуатації до 02.12.2023;
- ЗАЕС № 1 – 14.09.2016 подовжено термін експлуатації до 23.12.2025;
- ЗАЕС № 2 – 04.10.2016 подовжено термін експлуатації до 19.02.2026.

Ситуація з гідроелектростанціями також не є кращою. За даними [5], представленими в табл. 1:

Таблиця 1

Перелік гідроелектростанцій України

Назва	Потужність (МВт)	Запуск першої черги
Київська ГЕС	408,5	1964
Київська ГАЕС	235,5/135	1970
Канівська ГЕС	444	1972
Кременчуцька ГЕС	700,4	1959
Середньодніпровська ГЕС	352	1963

Продовження таблиці 1

Дністровська ГЕС	702	1981
Дністровська ГЕС-2	40,8	1999
Дністровська ГАЕС	1296	2009
Первомайська ГЕС	1,770	1929
Ташлицька ГАЕС	453	2006
Олександрівська ГЕС	11,5	1999
Теребле-Ріцька ГЕС	27	1955

Можна зробити висновок, що лише дві гідроелектричні станції є доволі «свіжими»: Дністровська ГАЕС (2009), Ташлицька ГАЕС (2006). Усі інші працюють тривалий строк і потребують коштів на відновлення. До того ж їх участь у загальному обсязі виробленої електричної енергії не є вирішальною.

Від початку XX ст. в Україні були побудовані малі ГЕС на багатьох малих річках. На кінець 1940-х – першу половину 1950-х років чисельність малих гідроелектростанцій в Україні становила понад 950 із загальною встановленою потужністю 300 МВт [6].

У середині 60-х років минулого століття будівництво МГЕС було майже повністю призупинено, а пізніше було припинено зовсім. Більшість існуючих малих ГЕС було згодом демонтовано, сотні з них зруйновано.

Для всіх сценаріїв розвиток великої гідроенергетики майже не передбачається, оскільки цей тип генерації визнається як нестале (unsustainable) відновлюване джерело енергії [7].

Теплові станції є більшим джерелом електричної енергії. За даними довоєнної статистики [8], розподіл за типами джерел наведено на рис. 1.

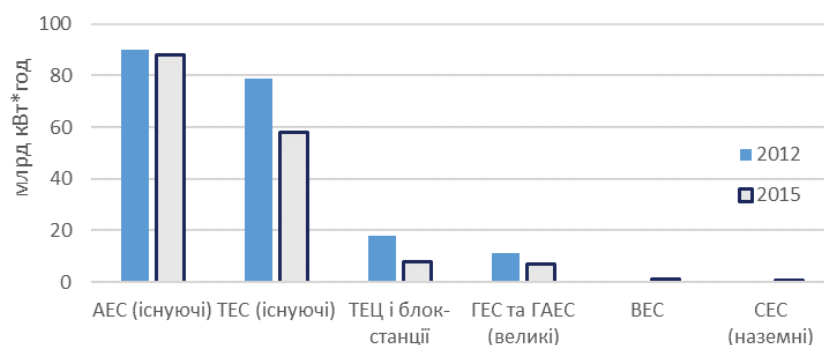


Рис. 1. Виробництво електроенергії, млрд кВт*год (Україна)

І це ситуація по основних джерелах електроенергії. Що стосується системи транспортування (різного типу вольтажності ЛЕП, кабельні лінії), системи розподілу також мають значний знос. Так, наприклад, за офіційними даними [9], електрообладнання одного із облenerго України має значний експлуатаційний знос (табл. 2), що в середньому становить 60%.

Водночас лінії електропередач також мають знос, що можна побачити з кількості відключень залежно від напруги лінії [9] (табл. 3).

Якщо взяти до уваги ще й завдані руйнування енергосистеми діями ворога, то можна констатувати проблему електропостачання. Тепер основне завдання системи електропостачання полягає у завданні не втратити керованість і забезпечити працездатність. До якісних показників електричної енергії ставлення за остаточним принципом, що і зрозуміло.

Але якість електричної енергії вкрай важлива для деяких підприємств. Саме неякісна електрична енергія може сприяти руйнівному ефекту впливу на обладнання. До того ж виникає

Таблиця 2

Кількість елементів підстанцій та стан їх зносу

№	Назва	Кількість, од	Знос, %
1	Силові трансформатори 110кВ	173	88
2	Силові трансформатори 35кВ	332	93
3	Силові трансформатори 6-10кВ	12947	64
4	Вимикачі 6-110кВ	7435	22
5	Комплекти ОД і КЗ 110 кВ	84	100
6	Комплекти ОД і КЗ 35 кВ	63	100
7	РП 6-10 кВ	272	82

Таблиця 3

Час відключення залежно від напруги лінії та причини

№	Напруга ділянки, кВ	Кількість відключень, од.	Час відключення, хв.	Причина відключення
1	110 кВ	38	5702	Опади
2	110 кВ	41	6065	Механічні
3	35 кВ	37	14510	Опади
4	35 кВ	23	8894	Механічні
	Всього	139	34340	

додатковий ефект, якщо електричне обладнання кінцевого споживача живиться електрикою низької якості, то саме це обладнання вносить ще більше погіршення у якість електричної енергії під час роботи обладнання [10; 11].

Така ситуація досить чутлива для підприємств теплопостачання, для яких працездатність обладнання є основою забезпечення умов життя для населення і підприємств господарювання. Тому було вирішено провести дослідження якості електричної енергії на підстанціях, із яких виконується живлення обладнання теплопостачаючого підприємства. Нині основне завдання підприємства – підтримати працездатність. А майже всі прилади і обладнання теплових підприємств працюють на електриці. Примусовий рух теплоносія у мережі створюється лише за допомогою електричних насосів. Основною рушійною силою для насосів є асинхронні електричні двигуни. Параметри асинхронних двигунів та їхній вплив на електричну мережу добре вивчений [12; 13]. І такі двигуни мають найбільшу поширеність на підприємствах. Їхня проста конструкція і легке підключення, що не потребує додаткових електричних пристроїв, є основними умовами їх такого розповсюдження. До того ж вони мають і технічні характеристики, що дають змогу широко їх використовувати. Асинхронні двигуни живляться переважно напругою від мережі. Тому одним із недоліків асинхронних двигунів – залежність від якості електричної енергії мережі. Можливі наслідки неякісної електричної енергії для живлення таких двигунів: підвищені втрати електричної енергії, зменшення строків служби двигунів, неможливість запуску. І для підприємств теплопостачання безперервність роботи таких двигунів є важливою умовою виконання усього підприємства виробничого завдання.

Формулювання мети статті. За результатами замірів показати наявність низького рівня якісних показників в електричній мережі живлення насосів підприємства теплопостачання, показати наявність відхилень напруги, провалів, гармонічних складників, що мають руйнівну дію для асинхронних двигунів насосів теплоносія.

Основна частина. У роботі розглядається теплопостачальне підприємство великого міста. Саме для обладнання такого підприємства і виконувалися дослідження по замірах показ-

ників якості електричної енергії. Основне обладнання теплопостачального підприємства – насоси. Насоси використовуються різних типів, але в дослідженні було звернено увагу тільки на параметри електричних двигунів цих насосів. Наприклад, у насосах марок Atmos GIGA-I 50/85-1,5/2, Atmos GIGA-N 100/160-30/2 використовуються електричні асинхронні двигуни на номінальну напругу змінного струму 380 В (трифазний двигун) із номінальною потужністю 1,5 кВт. У насосах марки Atmos GIGA-N 100/160-30/2 використовуються електричні двигуни на номінальну напругу змінного струму 380 В (трифазний двигун) із номінальною потужністю 30 кВт.

Здебільшого такі насоси живляться від загальноміських електричних підстанцій. Хоча вони і згруповані в насосних підстанціях, їхня потужність недостатня, щоб використовувати окрему електричну підстанцію. Слід зазначити, що рівень напруги 0,4 кВ має найнижчий рівень показників якості електричної енергії [14; 15]. Тому вплив неякісної електричної енергії є відчутним для роботи асинхронних двигунів, а відповідно, і насосів.

Для дослідження було вибрано дві котельні: котельня А – більшої потужності, що обслуговує 30 тис мешканців, і котельня Б – меншої потужності, що обслуговує 9 тис мешканців. Заміри з метою визначення рівня якісних параметрів були проведені на клемах ввіднорозподільного пристрою котельних теплопостачального підприємства міста

Попередні заміри для насосів системи теплопостачання були виконані в роботі [16]. Але зазначена робота була зконцентрована на втратах в електричній мережі живлення насосів, а в даній роботі автор розглядає якість електричної енергії, а саме увага була надана такому параметру, як провали напруги. Вплив від провалів напруги порівнюється з дією інших показників якості електричної енергії, тому в роботі наводяться результати замірів по декількох якісних параметрах електричної енергії.

Результати проведених замірів показників якості електричної енергії

Умови експлуатації обладнання впливають на якість електричної енергії, стан електроспоживаючого обладнання і на умови електропостачання. За висновками багатьох науковців у сфері електроенергетики, за якість електроенергії несуть відповідальність усі учасники системи електропостачання [17–19]. Показники якості електроенергії (ПЯЕ) регламентуються вимогами чинного стандарту ДСТУ EN 50160:2014 [20]. Деякі з регламентованих показників були виміряні на межі балансової приналежності на приєднаннях електричних підстанцій, від яких виконувалося живлення електричного обладнання підприємства теплопостачання [11; 14; 17; 18]. Вимірювання проводилися за допомогою приладів, розроблених професором О.Г. Грибом. Прилади являють собою мікропроцесорні аналізатори напруг і струмів в електричних мережах під назвою АНТЕС АК-3Ф. Усі вимірювання проводилися відповідно до ДСТУ EN 50160:2014.

Вимірювання якості електричної енергії включали протоколи вимірювань і графіки змінення параметрів. У протоколі вимірів було зафіксовано події та виходи показників якості електричної енергії за нормальні та гранично допустимі значення.

Нижче представлено результати вимірювань по параметрах якості електричної енергії, що проводилися для двох котельних мережі теплопостачання міста.

Відхилення напруги, що встановилася, у фазах А, В, С.

Результати вимірювання показано на рис. 1. Число проведених вимірів для котельної А становило 1350, число виходів за нормальне допустиме значення: фаза А – 37,8%, В – 68,9%, С – 88,9%. Число вимірів для котельної Б: 1440, число виходів за допустиме значення: фаза А – 100%, В – 100%, С – 70,8%.

Проміжний висновок: Відхилення напруги в мережі за час проведення вимірювання НЕ відповідає вимогам до якості електричної енергії.

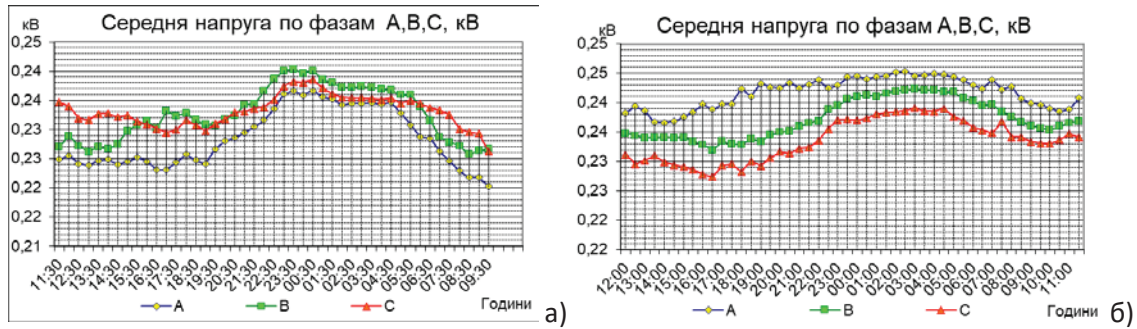


Рис. 1. Результати замірів відхилення напруги, що встановилося, у фазах А, В, С:
а) – котельня А; б) – котельня Б

Середня напруга прямої послідовності

Результати вимірювання наведено на рис. 2. Число проведених вимірів для котельної А – 1350, число виходів за нормальне допустиме значення – 57,8%. Число проведених вимірів для котельної Б: 1440, число виходів за нормальне допустиме значення – 100%.

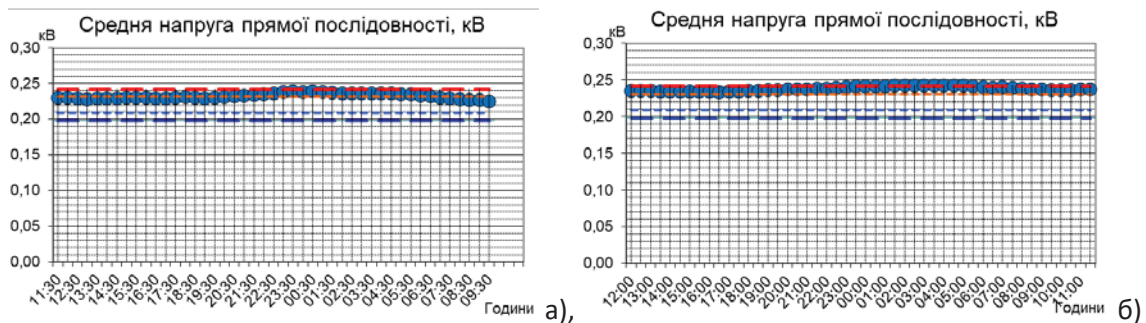


Рис. 2. Результати замірів відхилення напруги, що встановилося, по прямій послідовності:
а) – котельня А; б) – котельня Б

Проміжний висновок. Відхилення середньої напруги прямої послідовності в мережі за час проведення вимірювання НЕ відповідає вимогам до якості електричної енергії.

Відхилення коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною і за нульовою послідовністю

Результати вимірювання наведено на рис. 3. Число проведених вимірів для котельної А – 27000, число виходів за нормальне допустиме значення – 0%. Число проведених вимірів для котельної Б – 287990, число виходів за нормальне допустиме значення – 0%.

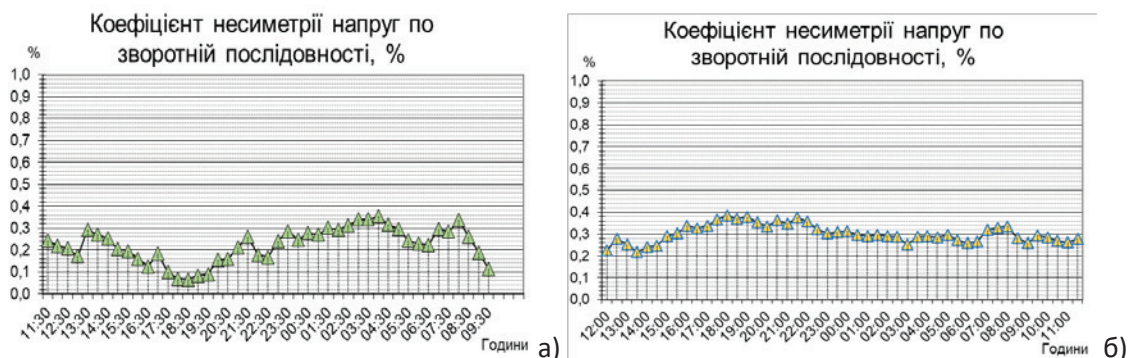


Рис. 3. Результати вимірювання коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю:
а) – котельня А; б) – котельня Б

Проміжний висновок. Відхилення коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю у мережі за час проведення вимірювання відповідає вимогам до якості електричної енергії.

Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю

Результати вимірювання наведено на рис. 4. Число проведених вимірів для котельної А – 1350, число виходів за нормальне допустиме значення – 55,6%. Число проведених вимірів для котельної Б – 28799, число виходів за нормальне допустиме значення – 39,6%.

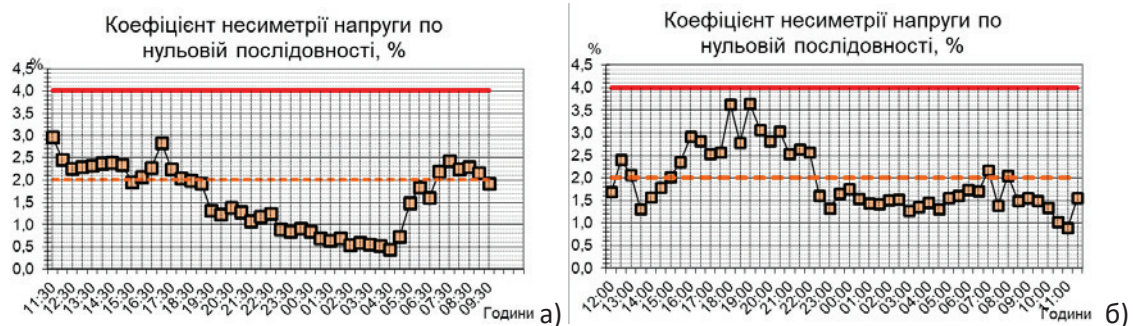


Рис. 4. Результати вимірювання коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю:
а) – котельня А; б) – котельня Б

Проміжний висновок. Відхилення коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю у мережі за час проведення вимірювання НЕ відповідає вимогам до якості електричної енергії.

Висновки. По отриманих від замірів результатах можна сказати, що переважна кількість показників якості електричної енергії не відповідає вимогам до якості електричної енергії. Два об'єкта підприємства теплопостачання громадських споживачів мають дуже споріднені проблеми з погляду параметрів якості електричної енергії. Хоча дві котельні мали різні потужності та різні відстані до споживачів, різну схему підключення до електричної мережі, але при цьому відхилення якісних показників електричної енергії в обох випадках значно виходять за межі нормативу.

Порядок використання обладнання теплопостачального підприємства такий, що режим їхньої роботи є безперервними протягом декількох місяців. І основними моментами роботи такого обладнання є зменшення строку роботи електричного обладнання і відсутність запуску двигунів після підключення до мережі. Для запобігання такого негативного впливу від неякісної електричної енергії рекомендується проведення низки заходів: облаштування фільтрів гармонічних складників, установлення стабілізаторів рівня напруги. Але до існуючих заходів можна додати регулювання непрямих параметрів, наприклад було відзначено залежність між рівнем показників якості і кількістю відпущеної теплової енергії. Такий метод є найбільш цікавим для теплопостачального підприємства в умовах, коли на підприємстві вже встановлюється обладнання когенерації, що дає змогу генерувати і теплову, і електричну енергію одночасно.

Список використаних джерел

1. ДБН В.1.2-14-2018 «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд», чинний з 01/01/2019. Київ, 2019. 30 с.
2. Постанова Кабінету Міністрів України № 687 «Про затвердження Порядку проведення технічного огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки».
3. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 «Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану» (діє з 01.04.2017). Київ, 2019.



4. Хмара Д. (2015). Експлуатація ядерних енергоблоків у понадпроектний термін. Світова практика і особливості процесу в Україні. URL: <http://nescu.org.ua/lifetime-extension201012>
5. Список гідроелектростанцій України. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%BE%D0%BA_%D0%B3%D1%96%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%86%D1%96%D0%B9_%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D0%B8 (дата звернення: 24.04.2025).
6. Звіт «Розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні». URL: <http://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2017/03/Rozvitok-VDE-v-Ukrai--ni.pdf>
7. Позиція WWF щодо розвитку гідроенергетики в Україні. URL: <http://wwf.panda.org/uk/?285130/hydropower-Ukraine>
8. Динамічні ряди показників енергетичних балансів за 1990–2018 роки (тестова версія). URL: https://ukrstat.org/uk/operativ/operativ2019/energ/drpeb/dr_u.htm (дата звернення: 05.02.2019).
9. План розвитку системи розподілу АТ «Харківобленерго» на 2020–2024 роки. URL: https://www.oblenergo.kharkov.ua/sites/default/files/pdf/plan_rozvytku_2020-2024_.pdf
10. Аналітичний центр досліджень енергетики. URL: <http://eircenter.com/>
11. Анализ и оценка экономических ущербов от низкого качества электрической энергии : монография / В.А. Онищенко и др. ; под ред. В.А. Онищенко. Харьков : Граф-Ікс, 2013. 329 с.
12. Попова І.О. Контроль режимів роботи асинхронних двигунів при несиметрії напруг мережі : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.16. Мелітополь, 2003. 20 с.
13. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. О технико-экономической целесообразности работы асинхронных двигателей в сетях с некачественной электроэнергией. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. 2008. Вип. 80. С. 58–62.
14. Качество электрической энергии в системах электроснабжения / А.Г. Баталов и др. Харьков : ХНАГХ, 2006. 272 с.
15. Качество электрической энергии. Т. 2. / О.Г. Грибидр. ; под ред. О.Г. Гриба. Харьков : Граф-Ікс, 2014. 244 с.
16. Карпалюк І.Т., Бондаренко М.О., Дегтяр Я.Д., Пишний О.В. Втрати електричної енергії з причини її низької якості на насосних станціях підприємств теплових мереж. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія «Гідравлічні машини та гідроагрегати». 2024. № 1. С. 88–94.
17. Гриб О.Р., Сендерович Р.А., Щербакова П.Р. Особливості використання параметрів режиму мережі визначення участі суб'єктів у спотворенні синусоїдальності кривої напруг. *Східноєвропейський журнал передових технологій*. 2007. № 5/4(29). С. 73–76.
18. Гриб О.Г., Сендерович Г.А., Щербакова П.Г. Актуальні задачі визначення дольової участі у відповідальності за порушення якості з електричної енергії.
19. Ковальов В.М. Про визначення відповідального за несинусоїдальний струм в електромережі. *Комунальне господарство міст*. 2012. Вип. 105. С. 365–369.
20. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160 2010, IDT). [Чинний від 2014-10-01]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 27 с.

Стаття надійшла до редакції 17.04.2025

Y. Kaurkin

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

POOR POWER QUALITY IN THE ELECTRICAL NETWORK SUPPLYING THE PUMPING STATIONS OF A HEAT SUPPLY ENTERPRISE

Summary

This article investigates the influence of electric power quality on the operational reliability and efficiency of asynchronous motors used in pumping equipment at district heating enterprises in Ukraine. The research is conducted



in the context of significant aging of power infrastructure, where more than 70% of equipment—such as power transformers, distribution substations, and cable lines—has exceeded its normative service life, leading to frequent technical failures and increased maintenance costs. The consequences of wartime challenges, including limited access to spare parts, irregular maintenance schedules, and disruptions in the energy supply chain, have further exacerbated these issues.

A detailed analysis of how poor power quality affects the performance of asynchronous motors is presented. These motors serve as the main drives for pumps responsible for circulating thermal fluids in centralized heating systems. The article highlights the motors' sensitivity to a wide range of power quality deviations, including voltage sags and swells, phase imbalance, frequency fluctuations, harmonic distortions, and transient overvoltages. These factors contribute to increased thermal stress, rotor vibration, premature bearing wear, and eventual breakdown of control and protection systems.

The study includes empirical data from field measurements performed at several operating heating plants. Real-time indicators of voltage, current, frequency, and total harmonic distortion (THD) are compared against national and international standards. The analysis reveals significant deviations from acceptable thresholds, confirming the urgent need for systematic diagnostics and technical interventions.

Finally, the article proposes a set of preventive and compensatory measures, such as the deployment of voltage stabilizers, harmonic filters, and online monitoring tools. Recommendations for modernization priorities are provided to ensure the stable and energy-efficient operation of heating networks under current and future conditions.

Keywords: electrical power quality parameters, induction motors, electrical power losses, zero-sequence voltage unbalance, deviation of the average direct-sequence voltage, coefficient of the n th harmonic component of the voltage, reliability of operation.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-5>

УДК 621.311.243

В. М. Козін¹, канд. техн. наукО. Ю. Савойський¹, канд. техн. наук

Г. В. Барсукова, канд. техн. наук

Т. С. Вольвач¹, асистентО. В. Рясна¹, ст. викладачА. Ю. Марченко¹, здобувач освіти

ORCID: 0000-0001-9821-7774

ORCID: 0000-0002-6459-4931

ORCID: 0000-0002-4261-2182

ORCID: 0000-0002-8890-6901

ORCID: 0000-0001-6917-6950

ORCID: 0009-0003-2757-2826

¹ Сумський національний аграрний університет

e-mail: oleksandr.savoiskyi@snau.edu.ua

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ГЕЛІОПАНЕЛЕЙ

Анотація. У статті виконано докладний огляд існуючих технологій виробництва складників сонячних панелей – фотоелементів, що входять до складу сонячних електростанцій. Визначено їхні переваги і недоліки та методи підвищення енергетичної ефективності, надійності відповідно до загальноприйнятої класифікації, яка включає три покоління – від класичних моно- та полікристалічних фотоелементів через тонкоплівкові технології на основі аморфного кремнію, CIGS і CdTe до сучасних III–V тандемних багатоперехідних фотоелементів, технологій на основі гетерокристалічного кремнію, перовскітних і квантово-точкових фотоелементів, а також проаналізовано сучасні тренди розвитку їх промислового виробництва у світі. Оглянуто питання екологічності технологій і стабільності роботи сонячних елементів. Акцентовано увагу на поступовому зростанні ролі тонкоплівкових технологій та розробленні гнучких фотоелементів, що все частіше використовуються для виробництва електроенергії на поверхнях довільної форми, повторюючи її.

Ключові слова: енергоефективність, електротехнологія, сонячний елемент, сонячна панель, проєктування фотовольтаїчних систем, екологічність.

Постановка проблеми. Виникнувши більше півстоліття тому з метою забезпечення електроенергією об'єктів космонавтики, зараз сонячні панелі можна часто зустріти навіть на дахах, вікнах і стінах звичайних житлових будинків або квартир. Такому розвитку сприяла низка чинників: здешевлення собівартості технології виробництва, тривалий термін служби сонячних панелей завдяки досить високій стабільності властивостей їхніх матеріалів та надійність експлуатації у цілому, їх екологічність, висока енергетична ефективність, що постійно підвищується, простота монтажу та можливість підбору найбільш естетичного виконання для заданих умов залежно від вибраної технології, а також деяких інших чинників. Усе це стало можливим завдяки невинному розвитку технологій виробництва геліопанелей та фотоелементів, що входять до їхнього складу. Починаючи від звичайного легування кремнію та створення одинарного р-п-переходу, технології, яка й досі не втратила своєї актуальності та комерційної привабливості і є навіть зараз наймасовішою у виробництві, до використання багатоперехідних, тандемних систем на основі, наприклад рідкоземельних елементів індію, галію, кадмію, селену або телуру, або на основі однієї з найсучасніших перовскітних, квантово-точкових чи органічних технологій фотоелементів, про їх сучасний стан, проблеми та методи їх вирішення, а також перспективи розвитку цих електротехнологій ітиметься у даній статті.

Формулювання мети статті. Метою дослідження є комплексний аналіз сучасного стану технологій виробництва фотоелементів для сонячних панелей, визначення їхніх переваг і недоліків, а також перспективних напрямів розвитку з акцентом на підвищення енергоефек-

тивності, гнучкості, екологічності та промислової придатності інноваційних фотоелектричних технологій.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

– провести класифікацію та порівняльний аналіз існуючих технологій виробництва сонячних елементів з урахуванням їхніх ефективності, технологічних особливостей та впливу на довкілля;

– визначити основні напрями розвитку новітніх фотоелектричних технологій (тандемні, перовскітні, органічні, квантово-точкові тощо) та оцінити їх перспективність для подальшого впровадження у промислове виробництво.

Основна частина. Технології геліопанелей, які складаються із сонячних елементів, традиційно поділяють на три покоління. На рис. 1 [1] можна побачити ретроспективний огляд різних технологій сонячних елементів та відповідні їх максимальні лабораторні ефективності. Синя і зелена лінії належать до першого і другого поколінь відповідно. Багатоперехідні фотоелементи та нові фотоелектричні перетворювачі, які відносять до третього покоління, зображено червоними, гірчичними та фіолетовими лініями.

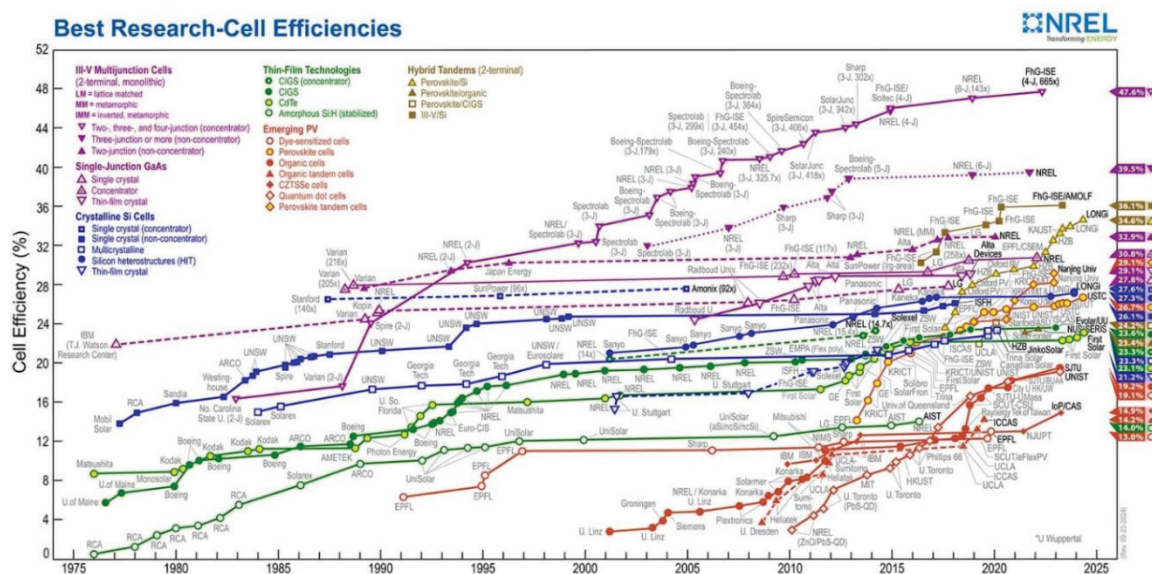


Рис. 1. Зведений графік ефективності перетворення енергії сонячних елементів

Фотоелементи першого покоління, що входять до складу фотоелектричної панелі, переважно створені на основі кремнієвих пластин. Це моно- і полікристалічні кремнієві фотоелементи. Вони, як правило, демонструють ефективність близько 15–25% та нині домінують на ринку. Значному поширенню кремнієвих сонячних панелей сприяють як досить гарно досліджене теоретичне підґрунтя технології, так і розвинута промислово-технологічна база, порівняно проста технологія легування, а також ефективна технологія нарізання його на шари необхідної товщини.

Переваги технологій першого покоління фотоелементів, що виникли майже 50 років тому, полягають в їхній високій продуктивності, тривалій стабільності, а також у наявності значних запасів сировини для їх виробництва. Однак вони не гнучкі, оскільки використовують кремній, що належить до матеріалів із непрямою забороненою зоною, що впливає на зменшення ефективності поглинання світла та створює необхідність збільшення товщини шару матеріалу, що підвищує ймовірність рекомбінації заряджених частинок і, як наслідок, спричиняє зменшення ефективності. Сучасні підходи для боротьби із цим недоліком полягають у викорис-



танні ретельної обробки (текстурування, пасивування) поверхонь шарів, що впливає на зростання вартості технології. Теоретична максимальна ефективність кремнієвих фотоелементів з однією забороненою зоною становить 33,16% [2], однак лабораторна досягає 27,3% [3] та має потенціал до покращення.

Геліопанелі другого покоління історично виникли і розвиваються паралельно першому. Їх виготовляють із таких матеріалів, як аморфний кремній, CIGS і CdTe, де типова ефективність становить 10–15%. Фотоелементи другого покоління визначаються як тонкоплівкові, оскільки вони використовують матеріали з прямою забороненою зоною. Вони можуть бути набагато тоншими та гнучкими. Однак, оскільки виробництво сонячних елементів другого покоління все ще використовує вакуумні процеси і високотемпературне оброблення, то для них характерне значне споживання енергії під час їх виробництва. Окрім того, вони часто містять дефіцитні елементи, наприклад кадмій, індій або телур, що є обмежувальним чинником із позицій їхньої вартості та можливої поширеності.

Третє покоління геліопанелей, яке належить до новітніх технологій, – складні комбіновані системи, утворені декількома простими фотоелектричними технологіями. До них можна віднести, наприклад, органічні фотоелементи, полімерні фотоелементи, які є їхньою підкатегорією, елементи Гратцеля, перовскітні, квантово-точкові фотоелементи. Це дорогі високоефективні та, як правило, експериментальні тандемні багатоперехідні сонячні елементи на основі напівпровідникових матеріалів III–V груп, переважно на основі арсеніду галію (GaAs), які є світовими рекордсменами з продуктивності. Застосування багатоперехідних технологій вимагає використання у таких системах концентраторів сонячної енергії, що значно ускладнює конструкцію.

Органічні сонячні елементи – це тип фотоелектричних елементів, які використовують органічні шари. До них належать полімерні сонячні елементи (підгрупа органічних сонячних елементів), а також інший основний тип органічних сонячних елементів – малі молекулярні сонячні елементи. Порівняно з пристроями на основі кремнію, органічні фотоелементи легкі, недорогі у виробництві, гнучкі, налаштовуються на молекулярному рівні, мають порівняно високу світлопропускну здатність, що досягає 80%, а також чинять менш негативний вплив на довкілля. Цим фотоелементам не вистачає як стабільності, так і ефективності, однак можна спостерігати постійний прогрес в обох напрямках. Наприклад, науковці з КНР досягли покращення лабораторної ефективності до 19,9% [4]. Передусім це реалізується за рахунок раціоналізації структури донорно-акцепторного переходу та молекулярного складу органічної електронної речовини фотоелементу.

Із 2009 р. почала офіційний розвиток модифікована версія тандемних, або багатошарових, органічних фотоелементів. Незважаючи на порівняно інтенсивне зростання лабораторної ефективності від близько 4% до 14,2% у 2020 р. згідно з [1], ця нова технологія досі не перевершила за ефективністю звичайні органічні фотоелементи, однак пошук шляхів її підвищення продовжується за рахунок збільшення кількості шарів та використання об'ємних гетероперехідних структур, які можна зробити достатньо товстими для ефективного поглинання фотонів. Для простих одношарових органічних і полімерних фотоелементів, основні сучасні дослідження складних багатошарових та об'ємних гетероперехідних структур [5] також спрямовані на вирішення проблеми стабільності, наприклад за рахунок створення подвійних структур об'ємного гетеропереходу або за рахунок впливу на морфологічну структуру під час проектування нових донорних і акцепторних матеріалів органічних сонячних елементів [6].

Сенсибілізовані барвником фотоелементи (елементи Гратцеля) були розроблені на основі напівпровідника, утвореного між фотосенсибілізованим анодом та електролітом. Сенсибілізований барвником сонячний елемент має кілька привабливих особливостей: він простий



у виготовленні за допомогою звичайних технологій рулонного друку, напівгнучкий і напівпрозорий, що дає змогу використовувати його у різних сферах, не властивих традиційним кремнієвим фотоелементам, а більшість матеріалів, окрім рутенію, що входить до складу органічного барвника, є недорогими [7]. Такі фотоелементи можуть бути успішно інтегровані, наприклад, у облицювальні матеріали будівельних конструкцій. Разом із тим вони на початку мали низьку ефективність, близько 4%, але були стабільними, мали низьку вартість та гарний естетичний вигляд [8]. У пристроях із великою активною площею дали змогу збільшити ефективність технології до 30% із забезпеченням тривалішої (понад 500 годин) експлуатаційної стабільності [9] за рахунок використання методу, що отримав назву «косенсибілізація». Він дав змогу розширити діапазон частот сонячного випромінювання, що можуть бути корисно поглинуті фотоелементом. До недоліків цих фотоелементів відносять низьку температурну стабільність, що вимагає використання у панелях охолоджувальних систем. Однак ця технологія лягла в основу подальшого розвитку іншої, більш ефективної перовскітної технології.

Перовскітні фотоелементи мають величезний потенціал із достатньо високою ефективністю у понад 25% на дуже малій площі елемента. Найчастіше це гібридні органічно-неорганічні матеріали на основі свинцевого або олов'яного галогеніду як активного шару для поглинання світла [10]. У сонячній енергетиці цю технологію почали використовувати трохи більше 15 років тому. За цей час ефективність перовскітних фотоелементів зросла від 3,9% до 26,7%. Разом із тим максимальна теоретична ефективність цих фотоелементів становить 44% [11] та продовжує покращуватися, у тому числі, наприклад, за рахунок створення тандемних перовскітно-органічних [12] або перовскітно-кремнієвих [13] сонячних елементів. Одна з останніх відомих технологій тандемних перовскітних фотоелементів, що стала відома у 2021 р., уже через три роки, за даними Університету Нанджунга (КНР), досягла ефективності 29,1% [14], що на 2,4% більше, ніж для традиційної перовскітної технології. Тандемні технології дають змогу ефективно поєднувати переваги різних типів сонячних елементів. Наприклад, поєднання технології кремнієвих фотоелементів із перовскітними дало змогу розширити спектр випромінювання, за якого створюються умови для виробництва електроенергії. У результаті було отримано ефективність 33,9% [13], що є світовим рекордом для даного типу фотоелементів. Обидві технології, перовскітна та органічна, для свого виробництва використовують порівняно низькі рівні температур, тому нова тандемна технологія сприяла зменшенню викидів парникових газів.

Перовскітні фотоелементи мають значний потенціал для досягнення значно більшої ефективності, оскільки у них можна налаштовувати ширину забороненої зони й оптимізувати їх під сонячний спектр. Залежно від умісту галогеніду ширина забороненої зони може змінюватися від 1,5 до 2,3 еВ. Однак для отримання найвищої ефективності сьогодні використовується та інтенсивно досліджується новий тип кристалу – FAPbI_3 , що належить до неорганічних перовскітів. Він дає змогу отримати ультростабільні та високоякісні фотогальванічні плівки [14]. Окрім того, ця технологія є більш технологічною, тобто вона має переваги виробництва органічних сонячних елементів, а отже, низькі виробничі витрати.

Поширеною проблемою, пов'язаною з перовскітними сонячними елементами, є вміст свинцю, тому елементи перовскітних поглиначів зараз намагаються виготовляти з матеріалів на основі олова, наприклад таких, як $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$. Вони мають нижчу ефективність, однак потенційно можуть забезпечити вирішення екологічної проблеми [15]. Стабільність – ще одна проблема, як і для органічних сонячних елементів, пов'язана з перовскітними фотоелементами. Нестабільність переважно пов'язана із впливом довкілля (високих температур, наявності вологості у повітрі і кисню), власним нагріванням під дією прикладеної напруги і фотовпливом (фотодеградація). Це питання було частково вирішене, наприклад, у дослідженні [16] завдяки

впровадженню технологій морфологічного структурування. Інший підхід до покращення стабільності досягається за рахунок використання спеціальних добавок, наприклад GBAC, що модулюють ріст та сприяють зменшенню дефектів перовскітної плівки [17].

Із 2010 р. продовжила стрімкий розвиток (хоча перші згадки [18] про неї датовані 1989 р.) тонкоплівкова технологія квантових точок. Її суть полягає у заміні використання об'ємних матеріалів, таких як кремній, CIGS або телурид кадмію з фіксованим значенням ширини забороненої зони, на квантові точки – напівпровідникові нанокристали, частинки розміром декілька нанометрів з оптичними та електричними властивостями, що відрізняються від властивостей звичайних більших частинок унаслідок квантово-механічних ефектів [19].

Сьогодні квантові точки є центральною темою нанотехнологій та матеріалознавства. Хоча дослідження [20] заявило про можливість отримання теоретичної ефективності 66% в умовах концентрованого сонячного світла, переважна більшість інших дослідників декларує значно менші реальні результати лабораторних вимірювань. Наприклад, відповідно до даних NREL протягом 2010–2023 рр. лабораторна ефективність цієї технології зросла з майже 4% до 19,1% (рис. 1), що менше, ніж для традиційних кремнієвих фотоелементів, однак технологія має низку переваг та активно досліджується. Найбільші значення ефективності (19,169%) були отримані у фотоелементах на основі квантових точок, утворених PbS та електронно-транспортним шаром ZnO, легованим Al [21]. Квантові фотоелементи можуть бути виготовлені за допомогою недорогих методів на основі колоїдних розчинів квантових точок і піддаються високошвидкісному друку. Однією з унікальних переваг квантово-точкових сонячних елементів є можливість налаштування смуги пропускання за рахунок зміни розмірів квантових точок. Ця унікальна властивість, що характерна також для перовскітних фотоелементів, не притаманна переважній більшості інших технологій. Наприклад, використання у структурі фотоелемента зелених люмінофорів тривалої дії дає змогу забезпечити роботу таких фотоелементів навіть за наднизької освітленості [22]. У роботі [23] показано ще одну перевагу: у квантових точкових фотоелементах виробляється більше електронно-діркових пар, аніж фотонів потрапляє на їхню поверхню, тобто квантова ефективність перевищила 100%. До переваг цих фотоелементів також відносять гарне співвідношення вихідної потужності до ваги, гнучкість. Серед недоліків технології виділяють токсичність більшості хімічних елементів, які утворюють квантові точки, що вимагає використання стабільних полімерних захисних оболонок [24], фотоелементи можуть деградувати під впливом вологи та ультрафіолетового випромінювання, а також можливе погіршення їхніх оптичних властивостей, складним залишається контроль за розміром квантових точок. Однак над усіма цими проблемами вчені продовжують активно працювати [25].

Понад два десятиліття від моменту відкриття напівпровідникових властивостей органічних полімерних фотоелементів вони постійно відставали як за продуктивністю і стабільністю, так і за ефективністю від багатьох інших, у тому числі класичних кремнієвих фотоелектричних технологій. Однак завдяки суттєвому прориву вчених із КНР у 2020 р., які спроектували та випробували органічний фотоелемент на основі нового багатокомпонентного підходу до морфології з використанням нових акцепторів для класичного будівельного блоку органічного фотоелементу на основі циклопентадітіофену, почалося стрибкоподібне зростання ефективності, яка нині вже зрівнялася і навіть дещо перевищила ефективність квантово-точкових фотоелементів (рис. 1). Ураховуючи простоту та дешевизну технології виготовлення фотоелементів, використання органічних розчинів на основі порівняно дешевих речовин, які легко синтезуються у необхідних кількостях, можливість установа на будь-які поверхні, а також поступове покращення стабільності, можливість застосування у тандемному виконанні, наприклад із перовскітною технологією, технологію органічних сонячних елементів можна віднести до однієї з перспективних.



За відносно високої ефективності, більшої дешевизни виробництва і можливості створення тонкоплівкових гнучких фотоелементів на основі перовскіту вони мають досить багато недоліків, які можуть суттєво обмежити їх використання: використання токсичних елементів для виробництва, малий ресурс основного компоненту. Однак сьогодні проводяться дослідження з покращення їх стабільності, зменшення впливу зовнішніх кліматичних чинників (температури і вологості) на ефективність і ресурс роботи. Особливо перспективними з позицій енергетичної ефективності видаються розробки тандемних і гібридних тандемних перовскітних фотоелементів. Такі технологічні рішення дають змогу внаслідок розширення ширини спектру ефективного поглинання сонячної енергії підвищити практично на третину загальну ефективність фотоелемента.

Технологія фотопанелей на основі квантових точок поки що не отримала широкого комерційного поширення, адже є однією з наймолодших і зараз знаходиться на стадії наукових досліджень. Однак її з упевненістю можна віднести до однієї з перспективних завдяки стрімкому та динамічному розвитку її ефективності. Завдяки інноваційному та запатентованому процесу безперервного потоку виробництва перовскітних квантових точок науковці намагаються суттєво знизити витрати на їх виготовлення. Інший напрям розвитку цієї технології полягає у здешевленні матеріалів, з яких виготовляють квантово-точкові фотоелементи. Замість дорогого рутенію поліпіридину намагаються використовувати нанокристали халькогенідів напівпровідникових металів, наприклад селенід або сульфід кадмію, селенід або сульфід свинцю. Однак, вирішуючи проблему вартості, дослідники стикаються з проблемою екологічності, тому пошуки оптимального матеріалу нині продовжуються.

Хоча тонкоплівкова технологія CIGS належить до другого покоління та розвивається досить повільно, однак нині вона отримала фінансування промислового виробництва у Швеції, що сприятиме подальшому поліпшенню її ефективності, особливо у напрямі використання гібридних тандемних технологій, наприклад перовскіт-CIGS.

Дані з фінансування промислового розвитку гетероперехідних HJT технологій свідчать, що уряди Нідерландів і КНР уже найближчим часом запланували будівництво заводів у свої країнах. Пріоритетним визнано виробництво перовскіт-кремнієвих тандемних модулів.

Незважаючи на можливість отримання рекордної для сучасних фотоелементів ефективності, використання багатоперехідних елементів поки що є вузькоспеціалізованим та експериментальним. Вони мають високу вартість унаслідок значних витрат на дослідження як самих фототехнологій, що утворюють їхню структуру, так і технологій поєднання переходів між собою. Значному підвищенню ефективності сприяє застосування концентрування сонячного випромінювання. Наприклад, використання концентратора для триперехідних сонячних елементів дає змогу покращити їх лабораторну ефективність більше ніж на 20% (рис. 1). Разом із тим необхідно розуміти, що такий підхід значно ускладнює енергогенеруючу систему, здорожчує її та зменшує загальну надійність. Дуже складним інженерним завданням є організація роботи сонячного концентратора на великій площі фотоелемента або на фотополі. Тому сьогодні такі передові технології, аналогічно до початкового етапу розвитку кремнієвих фотоелементів, отримують лише у лабораторіях, або, наприклад, у космічній галузі, де висока вартість обладнання може бути виправдана.

Висновки. Розглянувши сучасний стан переважної більшості новітніх та існуючих технологій геліопанелей, можна стверджувати, що подальший розвиток сонячної енергетики буде пов'язаний із продовженням досліджень у напрямках, що вже показали динамічне зростання протягом останнього часу: одно- та багатоперехідні сонячні елементи на основі GaAs, технологія з гетеропереходом, наприклад на основі кристалічного кремнію, тонкоплівкові технології CIGS і CdTe, перовскітні і квантово-точкові сонячні елементи, а також тандемні техноло-



гії, серед яких необхідно, передусім виділити перовскітно-кремнієву та технологію на основі напівпровідникових матеріалів III–V груп у поєднанні з кремнієм.

Необхідно зазначити, що перспективним може бути розроблення технологій сонячних концентраторів із метою підвищення ефективності багатоперехідних фотоелементів, технологій просвітлення шарів, періодичного очищення поверхні панелі, а також продовжитись пошук нових дешевих матеріалів для застосування у багатоперехідних сонячних елементах.

Загалом на підставі виконаного аналізу можна прогнозувати основні тенденції подальшого розвитку фотоелектричних технологій, які полягають у розширенні зон частотного спектру поглинутого сонячного випромінювання за рахунок впливу на ширину забороненої зони фотоелемента. При цьому повинні забезпечуватися доступність та поширеність використовуваних речовин, їх екологічність, екологічність технологій виробництва, а також тривалий термін експлуатації геліопанелі у широкому діапазоні температур довкілля без суттєвої втрати ефективності.

Список використаних джерел

1. National Renewable Energy Laboratory. Best Research-Cell efficiency chart. URL: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (дата звернення: 31.01.2025).
2. Rühle S. Tabulated values of the Shockley-Queisser limit for single junction solar cells. *Solar Energy*. 2016. Vol. 130. P. 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.015>
3. LONGi Sets New World-Record for Silicon Solar Cell Efficiency, Launching 2nd Generation Ultra-Efficient BC-Based Module. Longi. URL: <https://www.longi.com/en/news/longi-hi-mo9-bc-world-record> (дата звернення: 31.01.2025)
4. Fu J., Yang Q., Huang P., Yu R., Wang Y., Hou J. Rational molecular and device design enables organic solar cells approaching 20% efficiency. *Nature Communications*. 2024. Vol. 15. Article 1830. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46022-3>
5. Wang J., Wang Y., Bi P., Gao Y., Xu Y., Yang Y. Binary organic solar cells with 19.2 % efficiency enabled by solid additive. *Advanced Materials*. 2023. Vol. 35. Article 202301583. <https://doi.org/10.1002/adma.202301583>
6. Zhang R., Chen H., Wang T., Gao X., Liu H., Hu Z., Li Y., Chen Y., Liu F., Zhang J., Zhang M., Tang Z. Equally high efficiencies of organic solar cells processed from different solvents reveal key factors for morphology control. *Nature Energy*. 2024. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01678-5>
7. Dhonde M., Sahu K., Das M. Review – Recent advancements in dye-sensitized solar cells; from photoelectrode to counter electrode. *Journal of The Electrochemical Society*. 2022. Vol. 169. Article 066507. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac741f>
8. Szindler M., Szindler M., Drygała A., Wiczorek S., Kępiński L., Laskowska M., Bratek L. Dye-sensitized solar cell for building-integrated photovoltaic (BIPV) applications. *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 13. Article 3743. <https://doi.org/10.3390/ma14133743>
9. Ren Y., Zhang D., Suo J., Zhang Y., Li J., Wang Q., Wang C., Yang L., Yang J., Liu W., Wu Z. Hydroxamic acid preadsorption raises efficiency of cosensitized solar cells. *Nature*. 2023. Vol. 613. P. 60–65. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05460-z>
10. Manser J.S., Christians J.A., Kamat P.V. Intriguing optoelectronic properties of metal halide perovskites. *Chemical Reviews*. 2017. Vol. 116. No. 21. P. 12956–13008. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00136>
11. Li X., Bi D., Yi C., Luo J., Zhang F., Wang H., Yang Y., Yan Y., Duan H., Gao Z., Wei Z., Li N., Ma T., Xiao Z., Zhan X., Wang Q., Dou L., Gao W. A vacuum flash-assisted solution process for high-efficiency large-area perovskite solar cells. *Science*. 2016. Vol. 353. No. 6294. P. 58–62. <https://doi.org/10.1126/science.aaf8060>
12. Jiang X., Lang F., Li Y., Wei D., Zheng H., Hou J., Wu H., Zhao Y. Isomeric diammonium passivation for perovskite-organic tandem solar cells. *Nature*. 2024. Vol. 635. No. 8040. P. 860–866. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08160-y>
13. LONGi sets a new world record of 33.9 % for the efficiency of crystalline silicon-perovskite tandem solar cells. Longi. URL: <https://www.longi.com/en/news/new-world-record-for-the-efficiency-of-crystalline-silicon-perovskite-tandem-solar-cells> (дата звернення: 31.01.2025).

14. Sidhik S., Metcalf I., Li W., Kim T., Moon D., Choi S., Lee J., Jeon N., Lee S., Kim Y., Im S., Park N. Two-dimensional perovskite templates for durable, efficient formamidinium perovskite solar cells. *Science*. 2024. Vol. 384. No. 6701. P. 1227–1235. <https://doi.org/10.1126/science.abq6993>
15. Hao F., Stoumpos C.C., Cao D.H., Chang R.P.H., Kanatzidis M.G. Lead-free solid-state organic-inorganic halide perovskite solar cells. *Nature Photonics*. 2014. Vol. 8. No. 6. P. 489–494. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.82>
16. Lai H.M., Lu Z., Choi C.K.K., Kim T., Sun H., Ho H., Wang L., Ke M., Ren X. Direct room temperature synthesis of α -CsPbI₃ perovskite nanocrystals with high photoluminescence quantum yields: implications for lighting and photovoltaic applications. *ACS Applied Nano Materials*. 2022. Vol. 5. No. 9. P. 12366–12373. <https://doi.org/10.1021/acsanm.2c00732>
17. Li F., Deng X., Shi Z., Zhang Z., Zhang Q., Zhang X., Wei M., Wang H., Xu J., Wei Z., Luo D. Hydrogen-bond-bridged intermediate for perovskite solar cells with enhanced efficiency and stability. *Nature Photonics*. 2023. Vol. 17. P. 478–484. <https://doi.org/10.1038/s41566-023-01180-6>
18. Barnham K.W.J., Duggan G. A new approach to high-efficiency multi-band-gap solar cells. *Journal of Applied Physics*. 1990. Vol. 67. No. 7. P. 3490–3493. <https://doi.org/10.1063/1.345339>
19. Shishodia S., Chouchene B., Gries T., Schneider R., Ohtani R., Yoshida T., Hane K., Chen S. Selected I-III-VI₂ semiconductors: synthesis, properties and applications in photovoltaic cells. *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13. No. 21. Article 2889. <https://doi.org/10.3390/nano13212889>
20. Nozik A.J. Quantum Dot Solar Cells: Preprint. NCPV program review meeting Lakewood, Colorado NREL/CP-590-31011. 14–17 October 2001. Retrieved 06.01.2025. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31011.pdf>
21. Danladi E., Kashif M., Ouladmane M., Zong J., Imran M., Chen L., Qin M., Iqbal S., Li Z., Zhang Z., Zhang J. Modeling and simulation of > 19% highly efficient PbS colloidal quantum dot solar cell: A step towards unleashing the prospect of quantum dot absorber. *Optik*. 2023. Vol. 291. Article 171325. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.171325>
22. Yang J., Tang Q., Meng Q., Wei X., Zhao X., Zhang Y., Li H., Ren Y., Sun X. Photoelectric conversion beyond sunny days: all-weather carbon quantum dot solar cells. *Journal of Materials Chemistry*. 2017. Vol. 5. P. 2143–2150. <https://doi.org/10.1039/C6TA09261F>
23. Yan Y., Crisp R., Gu J., Zhang D., Yang L., Wang X., Li Q. Multiple exciton generation for photoelectrochemical hydrogen evolution reactions with quantum yields exceeding 100%. *Nature Energy*. 2017. Vol. 2. Article 17052. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.52>
24. Zhang Z., Wang W., Rao H., Li J., Zhang H., Cui Y., Sun J., Yang X., Liu Z., Xu B. Improving the efficiency of quantum dot-sensitized solar cells by increasing the QD loading amount. *Chemical Science*. 2024. Vol. 15. P. 5482–5495. <https://doi.org/10.1039/D3SC06911G>
25. Seo G., Han S., Lee D.G., Lee K., Park J., Han K., Lee H., Kim Y. Multifaceted anchoring ligands for uniform orientation and enhanced cubic-phase stability of perovskite quantum dots. *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 496. Article 154312. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.154312>

Стаття надійшла до редакції 23.04.2025

V. Kozin¹, O. Savoiskyi¹, H. Barsukova¹, T. Volvach¹, O. Ryasnaya¹, A. Marchenko¹

¹Sumy National Agrarian University

CURRENT STATE AND PERSPECTIVE DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF SOLAR PANELS PRODUCTION TECHNOLOGIES

Summary

The article provides a detailed review of existing technologies for the production of solar panel components – photovoltaic cells that are part of solar power plants. Their advantages and disadvantages and methods of improving energy efficiency and reliability in accordance with the generally accepted classification, which includes three generations, are determined: from classical mono- and polycrystalline photovoltaic cells through thin-film



technologies based on amorphous silicon, CIGS and CdTe to modern tandem III-V multijunction photovoltaic cells, technologies based on heterocrystalline silicon, perovskite and quantum dot photovoltaic cells, and analyzed current trends in the development of their industrial production in the world. The paper retrospectively shows the current trend towards the gradual transition of photovoltaic technologies to complex tandem systems combined from several different technologies, as well as to multijunction systems in order to expand the area of maximum efficient operation of the photovoltaic panel in a wider range of the solar radiation spectrum. The issues of environmental friendliness of technologies and stability of solar cells are reviewed. Attention is focused on the gradual increase in the role of thin-film technologies and the development of flexible photovoltaic cells, which are increasingly used to generate electricity on surfaces of arbitrary shape, repeating it. The results of the analysis can be used to optimize the selection of photovoltaic cells in the design of new solar power plants, enhancing their efficiency and reliability. Furthermore, the findings may serve as a foundation for further research in the field of developing innovative materials and structures for solar panels, as well as for the formulation of national strategies for the advancement of renewable energy and environmentally sustainable technologies.

Keywords: energy efficiency, electrical technology, solar cell, solar panel, photovoltaic system design, environmental friendliness.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-6>

УДК 620.9, 536.7, 621.3

О. В. Лука, аспірант

ORCID: 0000-0002-4178-8856

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

e-mail: oleksiyluka141@gmail.com

ВПЛИВ МЕЖЕВИХ ЗНАЧЕНЬ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Анотація. Запропоновано концепцію єдиного узагальненого енергоспоживання побутових споживачів, яка дає змогу враховувати взаємозамінність різних видів енергії та уніфікувати їх облік. Основою є приведення енергії до єдиної форми через уведення коефіцієнтів потреби, зовнішніх умов та ринкової вартості. Розроблено модель взаємопов'язаності енергій, що споживаються. Метод дає змогу адекватно порівнювати енергоспоживання між різними об'єктами незалежно від структури енергоресурсів. Це відкриває нові можливості для енергетичного моніторингу, оптимізації споживання, визначення енергетичної ефективності та розроблення механізмів управління попитом. Представлений підхід може бути застосований в енергетичних аудитах, під час формування тарифів, аналізу динаміки споживання та для побудови моделей енергетичної поведінки побутових споживачів.

Ключові слова: енергоспоживання, тепла енергія, електрична енергія, природні умови, показники якості електроенергії, взаємопов'язаність енергій, тіло енергетичного споживання.

Постановка проблеми. Основним споживачем енергії в Україні є громадський сектор (якщо брати до уваги інфраструктуру, пов'язану з населенням) [1].

Якщо порівнювати споживання енергії населенням і споживання промисловістю за категоріями, то можна побачити, що населення майже відповідає по обсягах. Але населення на відміну від промисловості є споживачем, який майже не створює додаткової вартості. І вартість споживання енергії населенням не може бути відпущена на повну ринкову вартість. Держава контролює ці обсяги енергії, і виходить так, що енергія, спожита населенням, є більш дорогою для держави. Тому економія споживання енергії для постачання населення має особливий стан для енергетичної системи України.

Із графіку на рис. 1 видно, що обсяги споживання електричної енергії населенням (побутовим сектором) менше, ніж промисловістю, у середньому на 27%.

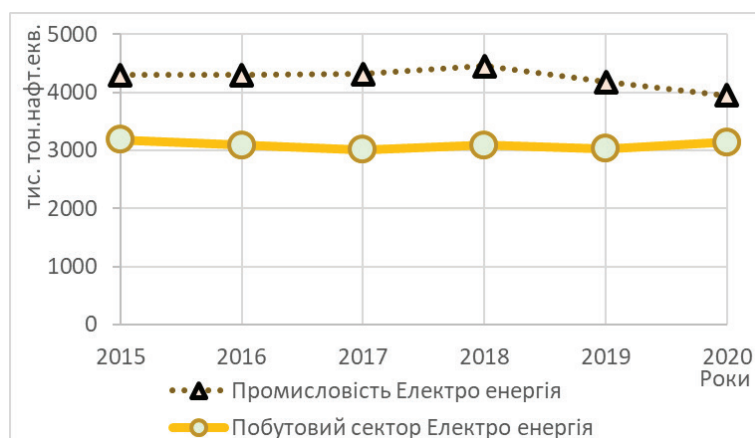


Рис. 1. Порівняння споживання електричної енергії по роках

Із графіку на рис. 2 видно, що обсяги споживання теплової енергії населенням менше, ніж промисловістю, у середньому на 41%.

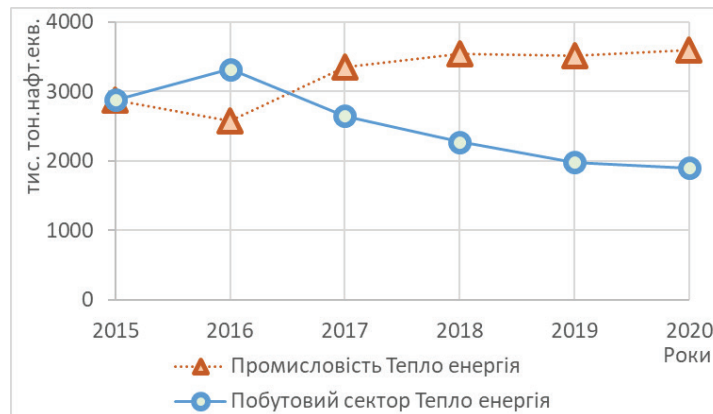


Рис. 2. Порівняння споживання теплової енергії по роках

Із графіку на рис. 3 видно, що обсяги загального споживання природного газу населенням більше, ніж промисловістю, у середньому на 203%.



Рис. 3. Порівняння споживання природного газу по роках

Із графіку на рис. 4 видно, що обсяги загального споживання енергії населенням майже такі самі, як і промисловістю [1].



Рис. 4. Порівняння споживання енергії загалом по роках

Населення в Україні має щільне скупчення в містах, тому саме міста є особливими споживачами різних видів енергії. Звідси виходить ціла низка проблем забезпечення споживачів енергією у містах. В умовах загальносвітової конкуренції на ринку енергії, виходячи з вимог економії енергоресурсів і дефіциту самих енергоресурсів в Україні, можна перелічити проблеми енергопостачання: оптимізація тепло-, газо- та електропостачання, оптимізація споживання електроенергії в комунально-побутовому секторі, підвищення ефективності централізованого теплопостачання. Оскільки проблема не нова, то шляхи вирішення таких завдань пропонувалися різними вченими [2–4].

Основна частина. Оскільки теплової енергії споживається досить багато в Україні, то виникає закономірне питання щодо її економії. Але в кліматичній зоні України не можна виконати промислові завдання або навіть задовільнити побутові потреби без забезпечення теплового комфорту в приміщеннях, тому зменшувати споживання енергії на забезпечення тепла не має можливості. Питання комфортної температури в зоні постійного перебування людини досліджували багато науковців [5; 6] і було закріплено в стандартах [7], а також Постановою Кабінету Міністрів України від 21 серпня 2019 р. № 830 «Про затвердження Правил надання послуги з постачання теплової енергії і типових договорів про надання послуги з постачання теплової енергії», а самі обсяги подачі тепла і порядок поводження з тепловою енергією регламентовано у [8]. Але водночас не припиняються роботи з удосконалення нормативів і спроб обґрунтувати зменшення витрат тепла. Один із таких шляхів – знайти відповідні режими керування, або режими технологічних процесів вироблення і доставки теплової енергії, щоб витрати первинного енергоресурсу на отримання теплової енергії зменшилися [9–11].

Рішення щодо зміни теплового супротиву огорожуючих конструкцій будівель, проведення повної реконструкції теплових мереж вважаються дієвими, але настільки об'ємними по витратах коштів і витрат робочого часу в людино-годинах, що не можуть сприйматися як швидкодієві. Тому автор зосередився на іншому боці невідповідності теплового режиму споживачів. Річ у тім, що з військовою агресією ворог пошкодив певну кількість теплоенергетичного обладнання. І на статистиці теплопостачання крупного міста України було отримано таку картину: за зменшення рівня тепла в приміщеннях зі знаходженням людей населення використовувало всілякі способи, щоб компенсувати нестачу в тепловому потоці в приміщенні за рахунок інших доступних видів енергії. Було відзначено деяку пов'язаність різних видів енергії. Коли виявлялися недостатні рівні теплоти від теплової мережі, населення використовувало, наприклад, електрообігрівачі, газові обігрівачі й навіть твердопаливні котли. Але під час детального розгляду питання відзначена наявність такої залежності й у таких ненормальних режимах роботи, як протягом останніх трьох років.

Пов'язаність різних типів енергії для забезпечення потреб споживача

Статистичні дані показали наявність взаємопов'язаності різних типів енергії під час використання споживачами. Спочатку таку залежність було виявлено суто технічно. Автор уже описував таку залежність у роботі [12]. Протягом значного проміжку часу теплопостачальники відзначають залежність між тепловою енергією, що подана до споживача, та іншими типами енергії, які можуть замінити або доповнити теплову енергію. Автор спробував поглянути на проблему споживання інших видів енергії, які не призначені безпосередньо для опалення приміщень, базуючись на підході взаємозамінності різних енергій. Було запропоновано ідею: розглядати всю сукупність енергій, яку споживає споживач, у вигляді одного загальноенергетичного споживання. Автором була сформульована концепція єдиного узагальненого енергоспоживання. Така концепція отримала розвиток у його дисертаційному дослідженні. Загальний принцип концепції єдиного узагальненого енергоспоживання описано в роботі [12]. Але за час досліджень концепція була доповнена, тому є потреба нагадати загальний принцип її побудови.

Виходячи з того, що кожний тип енергії має свої властивості, притаманні саме йому (технологічні особливості, одиниці вимірювання, параметри використання і навіть вартість), то порівнювати різні види енергії дуже важко. До цього їх порівняння проводилося в умовних одиницях: тоннах умовного еквівалентного палива. Таке вимірювання становило певні незручності. Наприклад, не враховувалися такі параметри, як вартість постачання, швидкість використання та ін. Для того щоб привести до одного виміру різні величини, потрібна інша система оцінювання.

На жаль, усі типи енергії, що споживає споживач, не можуть бути просто просумовані. Різні типи енергій мають різні додаткові параметри. Тому було запропоновано створення деякої і тільки однієї функції яка б узгодила правила, за якими можна було би порівнювати різні типи енергії між собою. Причому цінність енергії для споживача, швидкість подачі й інші параметри також мають враховуватися. Найбільш очевидним варіантом є виведення кореляційної залежності одного типу енергії іншим. Ця ідея є основою запропонованої моделі взаємозв'язаного енергетичного пулу, що споживає споживач [12].

Запропоновано величину певного енергоносія або певної енергії враховувати через залежність:

$$Q_i = Q_v \cdot f(B_{\text{ринк}}; k_{\text{потр}}; k_{\text{зовн}}), \quad (1)$$

де $B_{\text{ринк}}$ – вартість певного виду енергії на ринку;

$k_{\text{потр}}$ – безрозмірний коефіцієнт потреби споживача в певному виді енергії;

$k_{\text{зовн}}$ – безрозмірний коефіцієнт потреби в певному виді енергії залежно від температури оточуючого середовища;

Q_v – загальний обсяг відпущеної споживачеві енергії певного типу.

За використання такого підходу можливо врахувати різну кількість типів енергії, що споживає споживач, і додати нові, які ще не є у використанні.

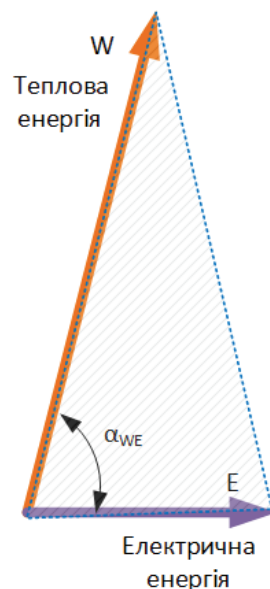


Рис. 5. Діаграма пов'язаності теплової та електричної енергії

Споживання теплової енергії у нашій країні є доволі високим. І якщо розглянути недостатній рівень теплової енергії, то споживачі його компенсують іншими типами енергії, які їм доступні. Виходячи з концепції взаємопов'язаності енергій, уводиться поняття «тіло енергетичного споживання» [12].

Але один із видів енергії, а саме електрична енергія, є найуніверсальнішою. Саме цю енергію і використовують насамперед для компенсації недоотриманої теплової. У термінах тіла загального енергоспоживання виконується вирівнювання тіла енергетичного споживання. Саме таке наднормативне споживання електричної енергії призводить до погіршення її якості.

Опираючись на концепцію взаємопов'язаності енергій, демонструючи її у графічному виконанні – «тіло енергетичного споживання» (рис. 6), стає очевидним, що зміни у споживанні видів енергії впливають на тіло енергоспоживання. Таке «тіло», його площа має бути певної величини для сезону, години доби, зовнішньої температури та ін.

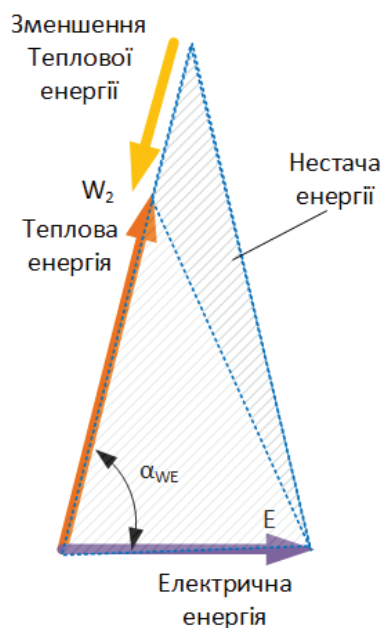


Рис. 6. Графічне представлення зменшення обсягів теплової енергії

Але за теорією тіла енергоспоживання площа тіла має бути скомпенсована іншим видом енергії (рис. 7).

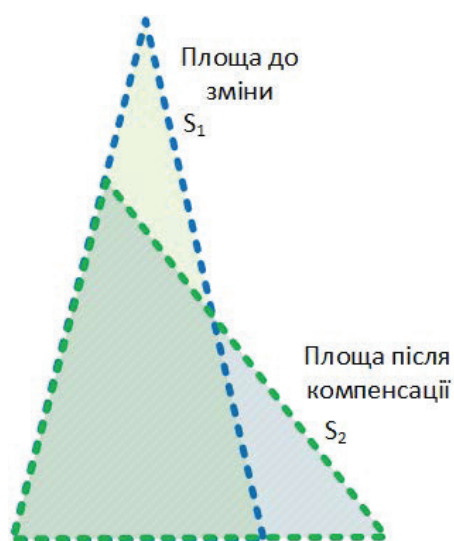


Рис. 7. Вирівнювання площі тіла енергоспоживання за рахунок компенсації

У нашому прикладі це електрична енергія (рис. 8).

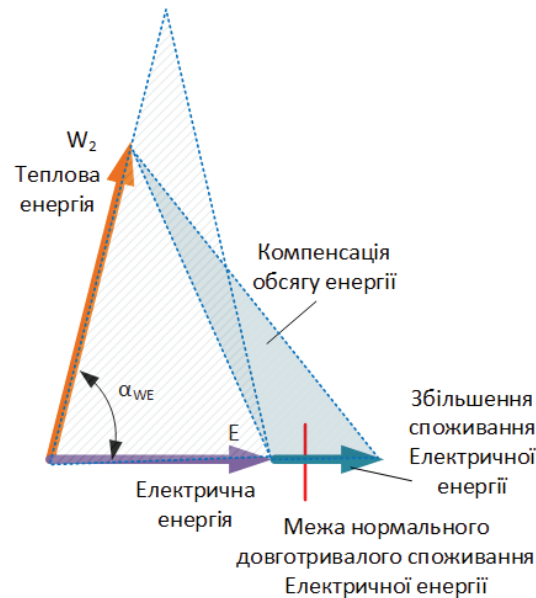


Рис. 8. Збільшення споживання електричної енергії для компенсації площі тіла енергоспоживання

Але потрібно звернути увагу, що компенсація обсягу енергії електричною енергією відбувається поза її межі довготривалого використання (рис. 8). І використання таких обсягів електричної енергії призводить до погіршення її якості [13; 14].

Таким чином, концепція взаємопов'язаності енергій дає змогу обґрунтувати умови, за якими контроль споживання одного типу енергії дає змогу проводити контроль інших видів енергії споживача за якісними показниками.

Оцінка за якісними характеристиками

Під час спостереження за обсягами енергоспоживання на реальних об'єктах було звернено увагу на те, що обсяги енергії, спожитої споживачем, не є основним критерієм. У реальності споживання енергій не є рівномірним у часі (рис. 9). Протягом місяця, тижня і навіть доби кількість енергії за різними типами буде споживатися в різних обсягах [15].



Рис. 9. Графік електроспоживання за добу робочого дня тижня

Рівень споживання залежить від цілої низки чинників. Єдиним механізмом обмеження енергоспоживання в електричній мережі України нині є відключення від електроспоживання. Саме такі дії можуть призвести до обмеження роботи або навіть призупинення роботи промис-

лових підприємств [6; 13; 14]. Тому використовувати обмеження енергоспоживання методами відключення не вихід.

Але під час моніторингу енергосистеми було зосереджено увагу на якісних показниках електричної енергії. З'ясувалося, що є певна межа споживання електричної енергії, за наближення до якої у відключенні споживача ще немає необхідності, а от якісні параметри електрики вже не відповідають нормативам. За аналогією з якісними показниками для електричної енергії було простежено залежності і для якісних параметрів інших типів енергії. Залежність якісних параметрів одного типу енергії від іншого також було виявлено.

За якісними показниками електроенергії житлових масивів можна отримати залежності для вторинного моніторингу якості теплопостачання.

Додатковий канал зворотного зв'язку дає змогу прискорити реакцію на зміну в моделі управління системами регулювання центрального теплопостачання.

Висновки. На даних потоку енергоспоживання різних типів енергії за концепцією пов'язаного енергоспоживання можна вирішити не тільки завдання загально енергетичного характеру, такі як виявлення різних чинників, взаємовплив енергій, виявлення збоїв у системі теплопостачання з метою їх подальшому запобіганню, здійснення оперативного контролю якості теплопостачання з корегуванням по непрямим показникам. З іншого боку, своєчасна корекція обсягів теплопостачання може призводити до покращення стану якості електричної енергії у мережі споживача

Список використаних джерел

1. Динамічні ряди показників енергетичних балансів за 2014–2020 роки. URL: <https://stat.gov.ua/uk/datasets/enerhetychnyy-balans-ukrayiny-0> (дата звернення: 20.01.2025).
2. Якість електричної енергії. Т. 2. Контроль якості електричної енергії / О.Г. Гриб та ін. ; за ред. О.Г. Гриба. Харків : ПП «Граф-Ікс», 2014. 244 с.
3. Popescu, Marius-Constantin & Mastorakis, Nikos. (2010). Aspects of thermal power plant automation. WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS. 9. 295-304.
4. Andarini R. The role of building thermal simulation for energyefficient building design Energy procedia. 2014. V. 47. P. 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.217>
5. Polyvianchuk, A., Semenenko, R., Kapustenko, P., Klemeš, J.J., & Arsenyeva, O. (2023). The efficiency of innovative technologies for transition to 4th generation of district heating systems in Ukraine. Energy, 263, 125876.
6. Arabkoohsar, A. (2019). Non-uniform temperature district heating system with decentralized heat pumps and standalone storage tanks. Energy, 170, 931–941. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.209>
7. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування [чинний від 01.01.2014] (Національні стандарти України). Київ : Держстандарт України, 2013. 135 с.
8. ДБН В.2.5-39:2008 Теплові мережі [чинний від 07.01.2009] (Національні стандарти України). Київ : Держстандарт України, 2008. 72 с.
9. Політика енергоефективності та енергозбереження як чинник національної консолідації: проблеми формування та реалізації : монографія/ Є.В. Перегуда та ін. Київ ; Тернопіль : Економічна думка, 2018. 202 с.
10. Zhu C., Xie X., Jiang Y. A multi-section vertical absorption heat exchanger for district heating systems. International Journal of Refrigeration. 2016. Vol. 71. P. 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.08.010>
11. von Rhein J., Henze G.P., Long N., Fu Y. Development of a topology analysis tool for fifth-generation district heating and cooling networks. Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 196. P. 705–716. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.066>
12. Якість електричної енергії як функція зв'язаного енергоспоживання міських енергомереж / О.Г. Гриб та ін. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Гідравлічні машини та гідроагрегати». 2022. № 2. С. 60–65.
13. Анализ и оценка экономических ущербов от низкого качества электрической энергии : монография / В.А. Онищенко и др. ; под ред. В.А. Онищенко. Харьков : ПП «Граф-Ікс», 2013. 329 с.



14. «Велике випробування»: експертка розповіла про наслідки відключень електрики для бізнесу. URL: <https://suspilne.media/334816-velike-viprobuvanna-ekspertka-rozpovila-pro-naslidki-vidklucen-elektriki-dla-biznesu/> (дата звернення: 21.01.2025).

15. Як змінюється споживання електроенергії за добу – «Укренерго». URL: <https://berdychiv-rada.gov.ua/2023/05/%D1%8F%D0%BA-%D0%B7%D0%BC%D1%96%D0%BD%D1%8E%D1%94%D1%82%D1%8C%D1%81%D1%8F-%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B6%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BD%D0%B5/> (дата звернення: 20.01.2025).

Стаття надійшла до редакції 17.04.2025

O. Luka

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

THE IMPACT OF HEAT SUPPLY LIMIT VALUES ON ELECTRIC POWER QUALITY

Summary

This paper proposes a concept of unified generalized energy consumption for household users, which accounts for the interchangeability of different types of energy and allows for their standardized assessment and analysis. Traditional approaches to evaluating energy consumption are based on direct measurements of consumed energy resources – electricity, natural gas, thermal energy, fuel, etc. – which do not provide an adequate assessment of actual energy needs and consumption efficiency under changing external conditions or energy supply structures. The proposed approach involves converting various forms of energy into a unified equivalent using three groups of coefficients: demand (reflecting the suitability of a specific type of energy for a given function), external conditions (temperature, humidity, technical constraints, etc.), and market value (consumer price of the energy resource). Based on this, a generalized representation of energy consumption is introduced in the form of an “energy consumption body” – an integrated set of energy carriers that collectively satisfy the household consumer’s energy needs. A model of energy connectivity is developed, enabling a mathematical description of resource substitution and identification of dominant consumption channels. This provides new opportunities for energy monitoring, comparative assessment of objects with different energy sources, consumption dynamics analysis, efficiency evaluation, and the development of demand-side management policies. The concept has promising practical applications in energy audits, tariff setting, modeling of consumer behavior, and the development of energy consumption forecasting systems.

Keywords: energy consumption, thermal energy, electrical energy, natural conditions, power quality indicators, energy interconnection, body of energy consumption.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-7>

УДК 621.311

О. О. Мірошник¹, докт. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6144-7573

В. Г. Пазій¹, ст. викладач

ORCID: 0000-0002-7336-0854

Д. Г. Миргород¹, аспірант

ORCID: 0000-0002-5494-6227

С. В. Галько², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7991-0311

Р. О. Ганус³, аспірант

ORCID: 0009-0001-2442-6087

¹Державний біотехнологічний університет, м. Харків²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного³Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

email: omiroshnyk@btu.kharkiv.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ПРИСТРОЮ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ РС830-ДЗ КОМПАНІЇ «РЗА СИСТЕМЗ» З ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ ТА СУЧАСНИМИ ЦИФРОВИМИ АНАЛОГАМИ

Анотація. У статті проведено аналітичне дослідження мікропроцесорного пристрою релейного захисту та автоматики РС830-ДЗ, розробленого компанією «РЗА СИСТЕМЗ». Розглянуто його технічні характеристики, алгоритми роботи, можливості налаштування, а також інтерфейси зв'язку. Здійснено порівняльний аналіз з електромеханічними реле, а також із сучасними мікропроцесорними пристроями провідних світових виробників. Виокремлено основні переваги РС830-ДЗ, серед яких – висока точність, швидкодія, доступність і простота інтеграції. Водночас виявлено низку обмежень, що пов'язані з відсутністю підтримки сучасних цифрових протоколів і меншою універсальністю у застосуванні. Стаття містить практичні рекомендації щодо доцільності використання пристрою у конкретних умовах експлуатації.

Ключові слова: релейний захист, мікропроцесорний пристрій, РС830-ДЗ, диференційний захист, електро-механічне реле, автоматизація, цифрова підстанція.

Постановка проблеми. Сучасна енергетика висуває високі вимоги до надійності, швидкодії та селективності систем релейного захисту, особливо в умовах зростаючої складності енергосистем та широкого впровадження відновлюваних джерел енергії [1–3]. Релейний захист як ключовий елемент автоматизованих систем керування електроустановками виконує критичну функцію – своєчасне виявлення аварійних режимів та забезпечення відключення пошкоджених ділянок мережі з мінімальним впливом на решту системи.

Серед різноманітних видів релейного захисту особливу роль відіграє дистанційний захист (ДЗ), який використовується переважно в мережах середньої та високої напруги [4; 5]. ДЗ базується на вимірюванні опорів ділянки лінії до місця пошкодження та дає змогу визначати відстань до КЗ (короткого замикання), забезпечуючи селективність навіть за складних режимів роботи мережі. Його перевагами є можливість резервування суміжних ділянок, незалежність від струму замикання та адаптація до зміни конфігурації мережі. Однак разом із цим дистанційний захист має і певні недоліки:

- обмеження точності за наявності нелінійних навантажень або змін параметрів мережі;
- складність у налаштуванні та обслуговуванні, особливо в електромеханічних та напівпровідникових пристроях старого зразка;
- відсутність гнучкої логіки роботи, необхідної для сучасних Smart Grid-систем.



Сьогодні на ринку представлені як традиційні електромеханічні пристрої, так і сучасні мікропроцесорні або цифрові рішення від провідних виробників (Siemens, Schneider Electric, SEL, ABB) [6–11]. Останні забезпечують широкі можливості налаштувань, інтеграцію зі SCADA, використання міжнародних стандартів (IEC 61850), реєстрацію подій та зв'язок через сучасні протоколи.

Разом із тим на ринку існують і менш відомі, але перспективні рішення від регіональних виробників, наприклад РС830-ДЗ компанії «РЗА СИСТЕМЗ» (Україна) [1; 2]. Пристрій реалізує повноцінний комплекс релейного захисту з дистанційними функціями, є адаптованим до потреб української енергосистеми та пропонує вигідне поєднання ціни і функціональності. Однак його характеристики ще не були широко представлені в незалежних технічних оглядах чи порівняннях із більш відомими аналогами.

Отже, виникає необхідність у системному аналізі та порівнянні пристрою РС830-ДЗ з іншими типами релейного захисту, як електромеханічними, так і сучасними цифровими, для визначення його сильних і слабких боків, а також потенціалу для модернізації та впровадження в енергетичних об'єктах різного рівня.

Аналіз останніх досліджень. У науковій та інженерно-технічній літературі значна увага приділяється розвитку та вдосконаленню релейного захисту, особливо в контексті цифровізації енергосистем. У роботах [12–16] висвітлюються ключові тенденції – перехід від електромеханічних та аналогових пристроїв до повністю цифрових рішень із можливістю дистанційного моніторингу, автоматичного самоналаштування та взаємодії у рамках Smart Grid.

Серед сучасних мікропроцесорних пристроїв захисту слід виділити такі рішення, як:

SIPROTEC 7SJ80 (Siemens) – забезпечує функції захисту ліній, трансформаторів та двигунів [6; 7]. Його перевагами є висока гнучкість у налаштуваннях, наявність вбудованого логічного контролера CFC, підтримка протоколів IEC 61850. Проте в практичному використанні можуть виникати складнощі з налаштуванням логіки для складних об'єктів, а також певна «складність» інтерфейсу.

Easergy P3 (Schneider Electric) – відзначається зручним інтерфейсом та широким функціоналом, зокрема підтримкою векторного аналізу струмів і напруг [8; 9]. Серед недоліків варто зазначити обмежену кількість входів/виходів у базових версіях та високу вартість порівняно з вітчизняними аналогами.

SEL-751 (Schweitzer Engineering Laboratories) – популярне рішення для захисту фідерів, має потужні алгоритми самодіагностики та підтримку SCADA. Проте інтерфейс конфігурування потребує глибоких знань, а специфікація англійською мовою створює додаткові труднощі під час упровадження в умовах вітчизняних підприємств [10; 11].

Зокрема, у працях Siemens [7], SEL [10] і Schneider Electric [8] розглядаються питання інтеграції релейного захисту із системами автоматизації, використання протоколу IEC 61850, функцій аналізу збурень та цифрових реєстраторів подій. У статтях [12; 13] акцентується увага на застосуванні алгоритмів адаптивного захисту та штучного інтелекту в мікропроцесорних пристроях.

Водночас у вітчизняному сегменті публікацій обмежено висвітлено тематику порівняльного аналізу локальних пристроїв захисту з продукцією світових брендів. Вітчизняний пристрій РС830-ДЗ, незважаючи на наявність позитивного досвіду впровадження в Україні, ще не став предметом поглибленого технічного аналізу в професійній літературі. Пристрій РС830-ДЗ від компанії «РЗА СИСТЕМЗ» розроблений з урахуванням потреб українських споживачів і спрямований на забезпечення максимальної сумісності з існуючими електромережами. У публікаціях компанії розкривається багатофункціональність пристрою: дистанційний захист, резерв-

ний струмовий захист, АПВ, АВР, а також можливість адаптації логіки роботи під конкретні умови об'єкта [1; 2]. Значними перевагами є зрозумілий інтерфейс, повна документація та вартість, нижча за імпортовані аналоги.

Таким чином, з'являється новий науковий напрям для комплексного дослідження, який аналізує подальший розвиток та вдосконалення вітчизняних рішень у сфері релейного захисту. Окрім цього, стає доцільним проведення комплексного дослідження, яке поєднає огляд функціональності, технічних характеристик та користувацького досвіду.

Формулювання мети статті. Порівняльний аналіз технічних характеристик мікропроцесорного пристрою релейного захисту та автоматики РС830-ДЗ компанії «РЗА СИСТЕМЗ» з електромеханічними та сучасними цифровими аналогами з метою виявлення його технічних переваг, недоліків, можливостей застосування та перспектив подальшої модернізації.

Основна частина. Сьогодні на ринку України представлено досить великий асортимент мікропроцесорних пристроїв РЗА різних виробників. Усі вони відрізняються за своїми функціоналом та ціною. Серед цих пристроїв уваги заслуговує пристрій РС830-ДЗ від компанії «РЗА-СИСТЕМЗ» [1].

Термінал РС830-ДЗ призначений для застосування у схемах релейного захисту та автоматики і забезпечує такі функції:

- релейний захист та автоматика ПЛ – 110–150 кВ (основний або резервний);
- резервний захист силового трансформатора – 110 кВ (є додатковим до диференційного захисту силового трансформатора), а також автоматика вимикача вводу 110 кВ трансформатора;
- релейний захист ПЛ – 35 кВ (основний) та автоматика високовольтного вимикача – 35 кВ.

РС830-ДЗ – цифровий пристрій, що поєднує у собі багато функцій. Він виконаний на сучасній елементній базі з якісних компонентів провідних світових виробників, поєднує у собі функції захисту, керування та контролю. На рис. 1 наведено загальний вигляд РС830-ДЗ.

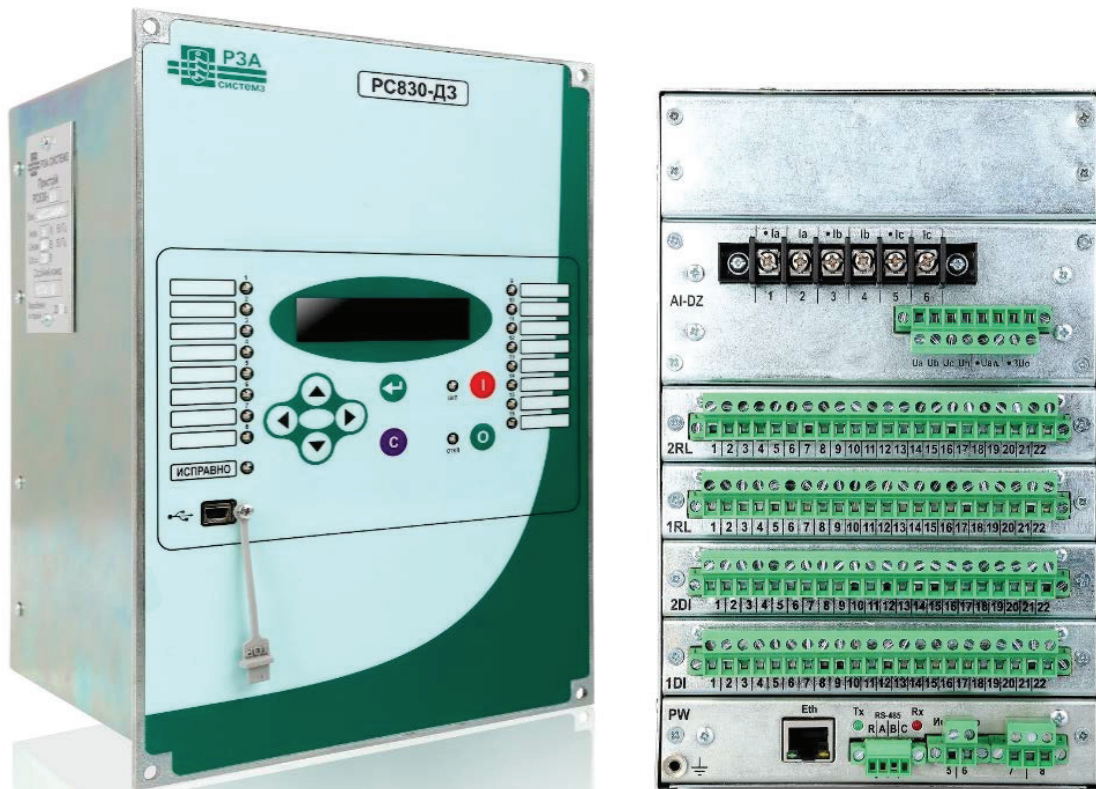


Рис. 1. Передня панель та задній бік пристрою РС830-ДЗ

Пристрій має такі основні функції захисту та автоматики [4]:

Таблиця 1

Функції захисту та автоматики пристрою РС830-ДЗ

Найменування функції	Кількість ступенів
Основний захист (ОЗ) від усіх видів КЗ	8
Направлений/ненаправлений захист від замикань на землю (ЗНЗ) по струму, опорі або напрузі нульової послідовності	8
Захист по струму зворотної послідовності (ОБР)	2
Захист по напрузі (ЗН)	2
Додаткові функції (ДФ)	8
Автоматичне повторне включення (АПВ)	2
АЧР/ЧАПВ (по дискретному входу)	2/2
УРОВ	2
Визначення місця пошкодження (ОМП)	+
Блокування при несправності ланцюгів напруги (БНН)	+
Блокування від коливань (БК)	+
Відстроювання від навантаження	+
Автоматика та керування вимикачем	1
Контроль синхронізму (КС)	+
Групи уставок	16
Інтерфейси Ethernet, RS-485, USB	+

Основні технічні характеристики пристрою наведено в табл. 2.

Основні характеристики пристрою включають таке:

- Кожен рівень захисту від перевантаження (ОЗ) може налаштовуватися як дистанційний захист (ДЗ) або спрямований максимально-струмовий захист (МТЗ) із функцією вибору напрямку, пуском за напругою та можливістю її відключення, а також із незалежними часово-струмовими характеристиками.
- Рівень ОЗ, налаштований як ДЗ, може мати полігональну, секторну (із центром у початку координат) або кругову (еліптичну) характеристику, що проходить через нульову точку.
- Для ДЗ може бути додатково налаштована зона у вигляді кола із центром у початку координат, що спрацьовує під час короткого замикання на шинах або живлення з протилежного боку лінії.
- Для ДЗ можуть бути активовані додаткові функції, такі як блокування за пошкодження ланцюга напруги, захист від коливань та адаптація до параметрів навантаження.
- У разі падіння напруги нижче 0,02 номінальної рівень ДЗ автоматично переходить у режим роботи за пам'яттю на 0,5 секунди.
- Кожен рівень захисту від замикання на землю (ЗНЗ) може працювати за струмом, опором або напругою нульової послідовності. Їхні характеристики та налаштування аналогічні параметрам рівнів ОЗ.
- Рівні ЗН можуть використовуватися як захист від міжфазних замикань (ЗМН) або захист від замикань на землю (ЗПН).
- Функція контролю синхронізації дає змогу застосовувати пристрій на лініях, що з'єднують ділянки енергосистеми з різними джерелами живлення.
- Наявність 16 груп уставок дає змогу використовувати пристрій як резервний захист на об'єкті вимикачі.



Таблиця 2

Основні технічні характеристики пристрою РС830-ДЗ

Найменування параметра	Значення
Номинальний струм	5 А
Номинальна напруга ланцюгів вимірювання	100 В
Номинальна напруга живлення, полярність довільна (~/=)	220 (110) В
Номинальна частота мережі	50 Гц
Діапазон уставок ОЗ в режимі ДЗ по опору при еліптичній або круговій характеристиці	0,1 – 500 Ом
Діапазон уставок ОЗ у режимі ДЗ по реактивному X_u та активному $R_{пр}$ опору при полігональній характеристиці	0,1 – 300 Ом
Діапазон уставок додаткової зони ступенів ОЗ у режимі ДЗ	0,1 – 300 Ом
Діапазон уставок блокування по опору навантаження	10 – 500 Ом
Діапазон уставок ОЗ в режимі МТЗ та ЗНЗ по розрахунковому струму	0,1 – 125 А (вторинних)
Діапазон уставок ЗНЗ по опору при еліптичній або круговій характеристиці	0,1 – 500 Ом
Діапазон уставок ЗНЗ по реактивному X_u та активному $R_{пр}$ опору при полігональній характеристиці	0,1 – 300 Ом
Діапазон уставок ЗНЗ по $3U_0$	2 – 100 В
Діапазони уставок ОБР: – по I_2 – по I_2/I_1	0,2 – 20 А 0,02 – 1 о.е.
Діапазон уставок по напрузі ЗН	10 – 150 В
Робочий діапазон напруги живлення пристрою, довготривало ~/=	80 – 264 В
Допустиме підвищення напруги живлення на час до 5 хвилин	420 В
Споживання по ланцюгах живлення при не спрацьовуванні вихідних реле	10 Вт
Збільшення споживання при спрацьовуванні реле	0,25 Вт/реле
Діапазон робочих температур	від -40° до $+70^\circ$ C
Кількість дискретних входів*	11/22/33/(44)
Кількість вихідних реле*	10/20/30/(40)

*Загальна кількість як блоків дискретних входів, так і вихідних реле повинна бути не більше 4

Оцінюючи функціональні характеристики мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики (РЗА), зокрема терміналу РС830-ДЗ, можна виділити низку ключових переваг:

- багатофункціональний пристрій, призначений для дистанційного або спрямованого струмового захисту в мережах напругою 110–220 кВ;
- до восьми ступенів основного захисту, які можуть налаштовуватися як дистанційні з різноманітними характеристиками або як спрямовані струмові;
- до восьми ступенів захисту нульової послідовності (ЗНЗ), що дають змогу налаштування на опір, струм або напругу нульової послідовності з різними типами характеристик;
- функція блокування за коливань, що базується на аналізі струмів прямої та зворотної послідовності, а також можливість її використання для блокування ступенів дистанційного захисту у разі несправностей у колах напруги, що відповідає вітчизняним стандартам;
- гнучка програмована логіка з простим механізмом налаштування;
- широкий діапазон живлення (від 80 до 420 В, до 5 хвилин);
- працездатність за температур від -40°C до $+70^\circ\text{C}$;
- низьке енергоспоживання (від 10 Вт);
- високий рівень захисту корпусу за стандартом IP54 (по лицьовій панелі);



- модульна конструкція з уніфікованими змінними блоками, що полегшує ремонт та адаптацію до різних завдань;
- функція визначення місця пошкодження;
- наявність детальної документації, включаючи керівництво з експлуатації, рекомендації щодо вибору уставок і вказівки з налагодження.

Під час використання цифрових терміналів для захисту ліній інформація про спрацювання захисту чи автоматики, а також електричні параметри до, під час і після аварійної події зберігаються у внутрішній пам'яті пристрою. Це дає змогу точно відтворити послідовність подій, що сприяє аналізу стану мережі під час серйозних збоїв. Реєстрація аварій відбувається з високою часовою роздільною здатністю, що дає змогу фіксувати події тривалістю в мілісекунди. Така точність допомагає визначити порядок спрацювання захисних механізмів і перевірити їх відповідність заданим параметрам. Усі дані зберігаються в енергонезалежній пам'яті терміналу.

Термінал оснащений системою самодіагностики та контролю стану вхідних і вихідних кіл, що забезпечує швидке виявлення несправностей. На відміну від електромеханічних систем, де проблеми часто залишаються непоміченими до моменту повного збою, мікропроцесорні пристрої дають змогу оперативно реагувати на неполадки.

Налаштування параметрів захисту в мікропроцесорному пристрої здійснюється через зручне меню, де можна вибрати потрібні значення. Можливість створення кількох наборів параметрів зі швидким перемиканням між ними значно спрощує тимчасову зміну налаштувань залежно від умов експлуатації.

Електромеханічні реле захисту протягом десятиліть були основою систем релейного захисту в енергетичних системах. Вони функціонують на основі електромагнітного принципу та відрізняються високою надійністю, довговічністю та простотою технічного обслуговування. Найпоширенішими представниками цієї групи є реле типу РТ-40, ТЗЛ-11, РТВ, РТМ тощо.

Серед переваг електромеханічних реле можна виділити:

- високу стійкість до електромагнітних перешкод;
- надійність в умовах відсутності складної електроніки;
- простоту в ремонті, можливість заміни окремих механічних елементів.

Водночас із розвитком енергетичних мереж [17–20], зокрема зростанням вимог до швидкості, гнучкості логіки, самодіагностики та цифрової комунікації [21; 22], електромеханічні реле поступово втрачають актуальність у нових проєктах.

Серед недоліків електромеханічних реле можна виділити:

- обмежену точність та чутливість;
- відсутність можливості адаптації захисту до змін режимів роботи;
- неможливість дистанційного моніторингу та керування;
- високу інерційність (час спрацювання – до 50–100 мс і більше);
- великі габарити та потребу в регулярному технічному обслуговуванні.

Для наочності нижче подано порівняння ключових характеристик електромеханічних реле із сучасним мікропроцесорним пристроєм РС830-ДЗ.

Таким чином, можна зазначити, що:

- мікропроцесорні пристрої, такі як РС830-ДЗ, значно перевершують електромеханічні реле за функціональністю, точністю та можливістю інтеграції у цифрові мережі;
- електромеханічні реле можуть залишатися доцільними лише у специфічних умовах (наприклад, у мережах із дуже жорсткими умовами ЕМС або за обмежених фінансових ресурсів);
- у випадках, коли потрібні гнучкість, дистанційне налаштування та інтеграція з автоматизованими системами керування, мікропроцесорне реле є однозначно кращим вибором.

Таблиця 3

Порівняння РС830-ДЗ з електромеханічними реле

Параметр	Електромеханічне реле	РС830-ДЗ (МП-реле)
Тип захисту	Обмежений набір	Комплексний, гнучкий
Точність вимірювань	Низька	Висока
Час спрацювання	50–100 мс	<20 мс
Протоколи зв'язку	Відсутні	Modbus, IEC 60870, IEC 61850 (опціонально)
Самодіагностика	Відсутня	Присутня
Наявність журналу подій	Відсутній	Так
Гнучкість налаштувань	Низька	Висока
Інтерфейс користувача	Відсутній	LCD-екран, програмне забезпечення
Сервісне обслуговування	Часте, механічний знос	Мінімальне
Живлення	Від оперативного струму	Універсальне живлення
Габарити та вага	Великі	Компактні

На ринку релейного захисту представлено низку відомих виробників, які пропонують потужні мікропроцесорні рішення: Siemens (SIPROTEC), ABB (RELION), Schneider Electric (SEPAM, MiCOM), General Electric (Multilin), SEL (Schweitzer Engineering Laboratories) тощо [3–8]. Ці пристрої підтримують широкий спектр функцій, зокрема: захист ліній, трансформаторів, шин, генераторів, вбудовані засоби автоматизації (АВР, АЧР, АПВ), підтримка цифрових протоколів зв'язку, інтеграція в Smart Grid-системи [12].

Порівняльний аналіз мікропроцесорних терміналів релейного захисту різних фірм виробників показав, що пристрій РС830-ДЗ українського виробника «РЗА СИСТЕМЗ» вигідно вирізняється за такими показниками:

- спеціалізація: пристрій розроблено спеціально для диференційного захисту трансформаторів, що забезпечує високу точність і швидкодію виявлення внутрішніх КЗ;
- компактність та простота інтеграції: підходить для реконструкції енергооб'єктів із мінімальними змінами в схемах;
- цінову доступність: за функціональністю наближається до провідних рішень, але в рази дешевший;
- адаптація до локальних умов: ураховано специфіку українських мереж та реалії експлуатації у пострадянських енергосистемах;
- український інтерфейс і наявність технічної підтримки на місці.

Висновки. На основі аналізу функціональності та порівняння мікропроцесорного пристрою РС830-ДЗ із традиційними електромеханічними реле та сучасними мікропроцесорними системами захисту слід зазначити, що РС830-ДЗ демонструє високу ефективність під час реалізації диференційного захисту трансформаторів, що підтверджується швидкодією, точністю виявлення аварій та простотою налаштування. Порівняно з електромеханічними реле пристрій має суттєві переваги: відсутність механічного зносу, вища точність, розширені можливості самодіагностики та цифрової комунікації. Пристрій має високу конкурентоздатність на локальному ринку завдяки цій доступності, простоті експлуатації та адаптації до українських умов. Окрім цього, РС830-ДЗ доцільно використовувати на трансформаторних підстанціях розподільних електромереж (6–35 кВ); на промислових підприємствах, які модернізують обладнання без суттєвих змін у вторинних колах; у проєктах, де потрібні надійність та функціональна автоматизація.

Список використаних джерел

1. Savchenko O., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Sereda A., Dudnikov S., Kozlovskiy O., Buinyi R., Halko S. Improving the Efficiency of Solar Power Plants Based on Forecasting the Intensity of Solar Radiation Using Artificial Neural Networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 137–140. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009>
2. Halko S., Halko K. Research of electrical and physical characteristics of the solar panel on the basis of cogeneration photoelectric modules. *Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial: Colección de documentos científicos «ΛΟΓΟΣ» con actas de la Conferencia Internacional Científica y Práctica*, 24 de abril de 2020. Barcelona, España: Plataforma Europea de la Ciencia. 2020. 2. 39–44. <https://doi.org/10.36074/24.04.2020.v2.10>
3. Галько С.В. Експериментальне дослідження і визначення параметрів когенераційного фотоелектричного модуля для гібридних сонячних електростанцій. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень : матеріали Міжнар. наук. конф.*, 10 квітня 2020 р. Луцьк : МЦНД. 2020. Т. 1. 83–90. <https://doi.org/10.36074/10.04.2020.v1.10>
4. RZA SYSTEMZ. PC830-ДЗ – Мікропроцесорний пристрій релейного захисту та автоматики. URL: <https://rzasystems.com/product/rs830-dz> (дата звернення: 24.04.2024).
5. RZA SYSTEMZ. Опитувальний лист на мікропроцесорний термінал PC830-ДЗ. URL: <https://rzasystems.com/wp-content/uploads/2024/01/OL-RS830-DZ-UA.pdf> (дата звернення: 24.04.2024).
6. Siemens. SIPROTEC 7SJ80 – Overcurrent Protection Relay. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/protection-relays-and-control/siprotec-compact/overcurrent-and-feeder-protection/overcurrent-protection-siprotec-7sj80.html> (дата звернення: 24.04.2024).
7. Siemens. SIPROTEC 7SJ80 – User Manual. URL: <https://www.manualslib.com/manual/1945624/Siemens-Siprotec-7sj80.html> (дата звернення: 24.04.2024).
8. Schneider Electric. Easergy P3 – Technical Data Sheet. URL: <https://www.se.com/us/en/download/document/P3TDSxxxxxEN> (дата звернення: 24.04.2024).
9. Schneider Electric. Easergy P3 – User Manual for P3U10, P3U20, and P3U30. URL: https://www.se.com/us/en/download/document/P3U_en_M-NAM (дата звернення: 24.04.2024).
10. Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). SEL-751 – Feeder Protection Relay. URL: <https://selinc.com/products/751> (дата звернення: 24.04.2024).
11. Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). SEL-751 Technical Datasheet. URL: <https://selinc.com/api/download/10734> (дата звернення: 24.04.2024).
12. IEEE Power System Protective Relays: Principles and Practices. URL: <https://site.ieee.org/sas-pesias/files/2016/12/PowerSystemProtectiveRelaysPrinciplesAndPractices.pdf> (дата звернення: 24.04.2024).
13. Ding Y., Chen F.F., Zhang Y., Yu H.W., Lan J.B. Design of substation-area protection and control equipment based on backboard bus. *Autom. Elect. Power Syst.* 2014. 38(24). 102–107.
14. Pazyi V., Miroshnyk O., Shchur T., Halko S., Nikolov M., Idzikowski A. Development of Simulation Model of Single-Phase Circuit Lock in the DigSILENT POWERFACTORY Program. *System Safety: Human – Technical Facility – Environment*. 2023. 5(1). 350–358. <https://doi.org/10.2478/czoto-2023-0038>
15. Miroshnyk O., Moroz O., Shchur T., Chepizhnyi A., Qawaqzeh M., Kocira S. Investigation of Smart Grid Operation Modes with Electrical Energy Storage System. *Energies*. 2023. 16(6). 2638. <https://doi.org/10.3390/en16062638>
16. Xiong C., Su Y., Zhang D., Chen L., Zhang H., Li Q. A New Distributed Robust Power Control for Two-Layer Cooperative Communication Networks in Smart Grids with Reduced Utility Costs. *Energies*. 2023. 16(6). 2911. <https://doi.org/10.3390/en16062911>
17. Liu Y., Gao H., Gao W., Peng F. Development of a Substation-Area Backup Protective Relay for Smart Substation. *IEEE Trans. Smart Grid*. 2017. 8. 2544–2553.
18. Al Issa H.A., Pazyi V., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Halko S. Determination of a Line with a Single-Phase Short Circuit in the Distribution Network Using the Method of Signal Input. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2023. 1–6. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312925>
19. Popescu C., Apostu S.A., Rădulescu I.G., Mureșan J.D., Brezoi A.G. Energizing the Now: Navigating the Critical Landscape of Today's Energy Challenges – An In-Depth Review. *Energies*. 2024. 17(3). 675. <https://doi.org/10.3390/en17030675>



20. Lima D.A.C., Bernardon D.P., Morais A.P., Oliveira A.L., Hokama W.S., Conceição J.B.R., Sartori Â.F. Review of Bus Differential Protection Using IEC 61850. *Energies*. 2022. 15(24). 9537. <https://doi.org/10.3390/en15249537>

21. Kim M.-S., Kang S.-H. Centralized Multiple Back-Up Protection Scheme with Sharing Data between Adjacent Substations Based on IEC 61850. *Energies*. 2022. 15(12). 4195. <https://doi.org/10.3390/en15124195>

22. Cao R.B. Implementation of digital integrated protection and control system. *Elect. Power Autom. Equip.* 2014. 34(5). 149–155.

Стаття надійшла до редакції 26.04.2025

O. Miroshnyk¹, V. Pazyi¹, D. Myrgorod¹, S. Halko², R. Hanus³

¹State Biotechnological University

²Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

³National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

RESEARCH AND COMPARISON OF CHARACTERISTICS OF THE MICROPROCESSOR RELAY PROTECTION DEVICE PC830-Д3 OF RPA SYSTEMS WITH ELECTROMECHANICAL AND MODERN DIGITAL ANALOGUES

Summary

Among the various types of relay protection, distance protection plays a special role, which is used mainly in medium and high voltage networks. Distance protection is based on measuring the resistance of a line section to the point of damage and allows you to determine the distance to a short circuit, ensuring selectivity even in difficult network operating modes. Its advantages are the possibility of redundancy of adjacent sections, independence from short-circuit current and adaptation to changes in network configuration. Today, the market offers both traditional electromechanical devices and modern microprocessor or digital solutions from leading manufacturers (Siemens, Schneider Electric, SEL, ABB). At the same time, there are also less well-known but promising solutions from regional manufacturers on the market, such as the PC830-Д3 from the RPA SYSTEMS company (Ukraine). The device implements a full-fledged complex of relay protection with distance functions, is adapted to the needs of the Ukrainian power system and offers a favorable combination of price and functionality. However, its characteristics have not yet been widely presented in independent technical reviews or comparisons with more well-known analogues. Therefore, there is a need for a system analysis and comparison of the PC830-Д3 device with other types of relay protection – both electromechanical and modern digital – to determine its strengths and weaknesses, as well as the potential for modernization and implementation in energy facilities of various levels. The article conducts an analytical study of the microprocessor device for relay protection and automation PC830-Д3, developed by the company «RPA SYSTEMS». Its technical characteristics, algorithms of operation, customization options, as well as communication interfaces are considered. A comparative analysis was carried out with electromechanical relays, as well as with modern microprocessor devices of the world's leading manufacturers. The main advantages of the PC830-Д3 are highlighted, including high accuracy, speed, availability and ease of integration. At the same time, a number of limitations have been identified related to the lack of support for modern digital protocols and less versatility in application. The article contains practical recommendations on the feasibility of using the device in specific operating conditions.

Keywords: relay protection, microprocessor device, PC830-Д3, differential protection, electromechanical relay, automation, digital substation.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-8>

УДК 621.311:621.311.25

Р. В. Оксенич¹, аспірант

ORCID: 0000-0002-6510-5108

С. В. Галько², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7991-0311

А. І. Середа¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-7670-6822

С. А. Попадченко¹, ст. викладач

ORCID: 0000-0003-2537-9769

Д. М. Зеленков², аспірант

ORCID: 0009-0002-9685-9196

¹Державний біотехнологічний університет, м. Харків²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: galkosv@gmail.com

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЛІТІЙ-ЗАЛІЗО-ФОСФАТНИХ ТА НАТРІЙ-ІОННИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Анотація. Накопичення енергії являє собою процес зберігання, вивільнення та управління енергетичними ресурсами за допомогою спеціалізованих систем акумулювання. У сучасних умовах розвитку енергетики ця технологія набуває дедалі більшого значення, зокрема у зв'язку з активним упровадженням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Оскільки виробництво енергії з таких джерел, як сонячна та вітрова, є нестабільним і не піддається прямому регулюванню, виникає необхідність у її зберіганні в періоди надлишкового виробництва або зниженого попиту. У цьому контексті перспективними рішеннями є літій-залізо-фосфатні (LiFePO) та натрій-іонні (Na-Ion) акумуляторні системи, які відкривають нові можливості для локального зберігання енергії. Завдяки високій енергоефективності ці технології мають потенціал для широкої інтеграції в енергетичну інфраструктуру – від побутового використання до промислових масштабів. У роботі проведено порівняльний аналіз електрохімічних систем накопичення енергії на основі LiFePO₄- та Na-Ion-акумуляторів. Особливу увагу приділено їхнім технічним характеристикам, енергоефективності, довговічності та матеріалам, що використовуються у виробництві. Розглянуто економічну доцільність упровадження зазначених технологій як у побутовому, так і у комерційному секторах.

Ключові слова: натрій-іонні акумулятори, літій-залізо-фосфатні акумулятори, зберігання енергії, моніторинг заряду.

Постановка проблеми. Забезпечення надійного, сталого та доступного енергопостачання є одним із ключових завдань для сучасного суспільства, що зумовлено як стрімким зростанням чисельності населення, так і поступовим вичерпанням ресурсів викопного палива. У контексті технологій зберігання енергії сьогодні найбільш широко використовуваними та технологічно розвиненими є літій-іонні акумулятори, які характеризуються високою енергетичною щільністю, тривалим терміном експлуатації та відносно низькою масою. Завдяки зазначеним характеристикам літієві накопичувачі знайшли широке застосування у портативній електроніці, комп'ютерній техніці, електричному транспорті, мобільних пристроях, а також у стаціонарних системах накопичення енергії [1; 2]. Утім, стрімке зростання попиту на літій-іонні акумулятори супроводжується проблемою обмежених природних запасів літію у земній корі [3]. У зв'язку із цим актуальним є пошук альтернативних рішень, серед яких особливу увагу привертають натрій-іонні акумулятори. Натрій є значно поширенішим елементом у природі порівняно з літієм, що робить його перспективним ресурсом для масштабного виробництва накопичувачів енергії [4]. Незважаючи на те що натрій-іонні батареї демонструють нижчі показники енергетичної ефективності, вони залишаються об'єктом активних наукових досліджень. Існують підстави вважати, що в найближчому майбутньому за рахунок удосконалення



матеріалів та інженерних рішень їхні показники щільності енергії та довговічності можуть перевищити характеристики літій-залізо-фосфатних систем накопичення [3; 5].

Аналіз останніх досліджень. Пошуки більш безпечних, доступних та екологічно сталих рішень для зберігання енергії технології літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) та натрій-іонних (Na-Ion) акумуляторів привертають дедалі більшу увагу наукової спільноти та промисловості. Попри значний прогрес у розвитку літєвих систем глобальні запаси літію залишаються обмеженими та нерівномірно розподіленими, що підвищує вартість і створює ризики для стабільності постачання. Натомість натрій є значно більш поширеним елементом у земній корі, має рівномірніший географічний розподіл і нижчу вартість, що робить його привабливою альтернативою для масштабного використання [4].

Натрій-іонні акумулятори демонструють низку унікальних характеристик, що сприяють їх перспективності, зокрема для стаціонарних систем накопичення енергії. На відміну від багатьох літєвих аналогів Na-Ion-батареї не потребують використання критично важливих або геополітично чутливих матеріалів, таких як кобальт чи нікель. Це суттєво зменшує ризики, пов'язані з ланцюгами постачання, та підвищує загальну стійкість технології.

Сучасні досягнення у галузі матеріалів для електродів, особливо впровадження шаруватих оксидів, значно покращили як енергетичну щільність, так і здатність зберігати заряд у натрій-іонних системах [6; 7; 38]. Однією з ключових переваг Na-Ion-акумуляторів є їхня підвищена ефективність за низьких температур, що робить їх особливо придатними для використання у кліматично суворих регіонах, де літєві системи демонструють знижену продуктивність. Окрім того, заміна мідного струмознімального шару на алюмінієвий зменшує вартість виробництва та спрощує переробку, що підвищує екологічну привабливість Na-Ion-технології [8].

Утім, широкомасштабна комерціалізація натрій-іонних акумуляторів усе ще залишається викликом. Хоча лабораторні прототипи демонструють обнадійливі результати, реалізація повноцінного виробництва потребує оптимізації електролітних композицій та вдосконалення виробничих процесів для забезпечення довготривалої стабільності циклів заряджання-розряджання. Відносно нижча енергетична щільність порівняно з літій-іонними аналогами обмежує застосування Na-Ion-батареї у високопродуктивних мобільних пристроях та електротранспорті, натомість роблячи їх особливо придатними для стаціонарного зберігання енергії та інтеграції в електромережі.

Попри зазначені обмеження зростання інвестицій і науковий інтерес до натрій-іонних систем свідчать про їхню потенційну ключову роль у процесі глобального енергетичного переходу [9]. Обидві технології – LiFePO_4 та Na-Ion – функціонують за схожим принципом перенесення іонів, однак різняться за хімічним складом, технічними характеристиками та сферами застосування.

У цьому дослідженні буде проведено порівняльний аналіз основних параметрів указаних типів акумуляторів із метою визначення їхніх переваг, недоліків та доцільності використання залежно від специфіки застосування. З урахуванням стрімкого технологічного прогресу обидва напрями продовжують демонструвати значний потенціал у сфері зберігання енергії..

Формулювання мети статті. Виконати порівняльний аналіз літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) та натрій-іонних (Na-Ion) накопичувачів енергії з метою надання рекомендацій для конкретних сфер використання.

Основна частина. У дослідженні здійснено порівняльний аналіз кількох типів акумуляторних систем зберігання енергії, зокрема літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) та натрій-іонних (Na-Ion) акумуляторів. Для реалізації поставлених цілей було використано широкий спектр джерел, включаючи рецензовані наукові публікації, технічну документацію провідних виробників, результати лабораторних експериментів, а також узагальнені статистичні дані, що ілю-

струють практичний досвід упровадження зазначених технологій у таких сферах, як відновлювана енергетика, електричний транспорт і стаціонарні системи зберігання енергії [10–12].

Аналіз отриманих даних дав змогу ідентифікувати ключові технічні переваги й обмеження кожного з розглянутих типів акумуляторів, а також визначити оптимальні умови їх застосування з урахуванням специфіки експлуатаційних навантажень та галузевих вимог [9].

У рамках дослідження було детально розглянуто конструкцію літій-залізо-фосфатних (LiFePO) та натрій-іонних (Na-Ion) систем накопичення енергії [13].

Літій-залізо-фосфатні акумулятори зазвичай мають таку будову (рис. 1): катод виготовлений на основі літій-залізо-фосфату (LiFePO₄); анод, як правило, складається з графіту або іншого вуглецевого матеріалу; електроліт може бути рідким, гелеподібним або твердим, зазвичай на основі солей літію в органічному розчиннику; сепаратор – це мікропористий полімерний матеріал, такий як поліетилен (PE) або поліпропілен (PP), який виконує функцію ізоляції між електродами, запобігаючи короткому замиканню; корпус виготовляється з металевих або полімерних матеріалів, що забезпечують герметичність і механічну стабільність елемента.

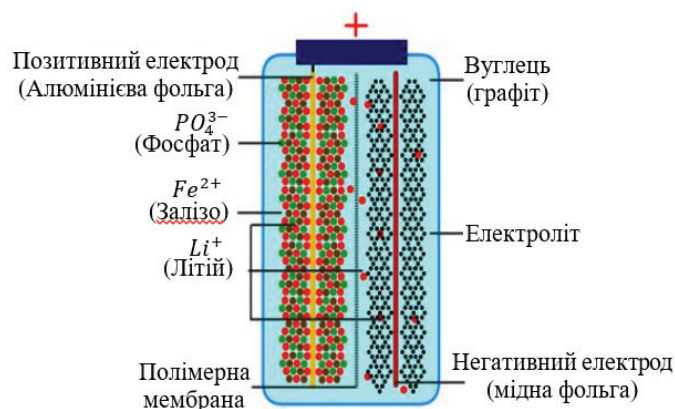


Рис. 1. Будова акумулятора LiFePO₄ [14]

Літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO₄) характеризуються використанням літій-залізо-фосфату як катодного матеріалу та графітового вуглецевого електрода з металевою підкладкою як аноду. На відміну від традиційних катодних матеріалів сполука LiFePO₄ належить до класу поліаніонних матеріалів, до складу яких входять декілька аніонів із високою електронегативністю, зокрема фосфатні групи. Основний принцип функціонування цих акумуляторів відповідає загальній схемі роботи літій-іонних джерел струму: у процесах заряджання та розряджання іони літію здійснюють зворотну міграцію між електродами. Однією з визначальних переваг LiFePO₄ є його висока екологічна безпечність. На відміну від оксидів кобальту та марганцю фосфатні сполуки є нетоксичними, що значно знижує екологічні та техногенні ризики під час експлуатації й утилізації елементів живлення.

Конструкція натрій-іонного акумулятора (Na-ion), представлена на рис. 2 [2], демонструє високий ступінь структурної аналогії з літій-іонними системами, однак із заміною літію на натрій як основного іонного носія. У таких системах катод формується з натрієвмісних сполук, тоді як анод зазвичай виготовляється з вуглецевих матеріалів – твердого вуглецю, графіту або вуглецевих наноструктур. Як електроліт використовуються органічні розчинники з розчиненими натрієвими солями, зокрема NaPF₆ або NaClO₄. Аналогічно до LiFePO₄-акумуляторів у ролі сепаратора застосовується мікропориста полімерна мембрана на основі поліетилену або поліпропілену. Зовнішній корпус елемента зазвичай виготовляється з металу або термостійкого полімерного матеріалу, що забезпечує механічну стабільність та безпечність експлуатації.

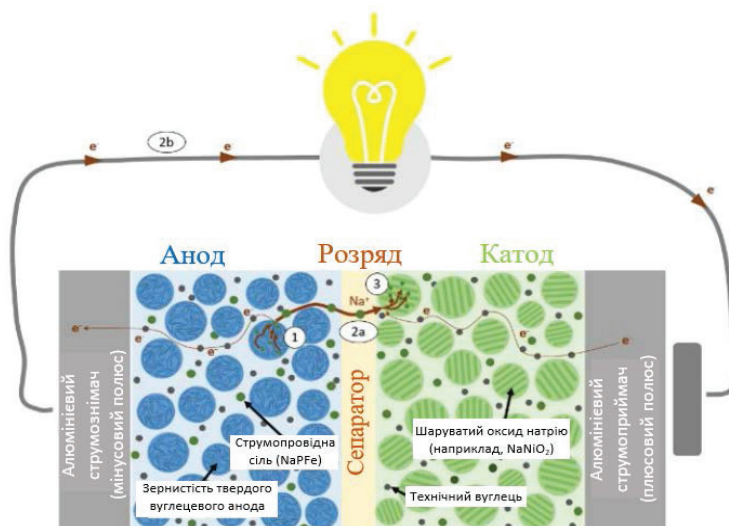


Рис. 2. Будова Na-Ion-акумулятора [6]

Базова архітектура натрій-іонного акумулятора загалом є аналогічною до структури літій-іонного акумулятора. Як ілюстровано на рис. 2, натрій-іонний елемент містить два основних електроди – анод і катод, які виконують функцію накопичення енергії за рахунок зворотної інтеркаляції натрій-іонів. Для запобігання прямому контакту між електродами, що може спричинити коротке замикання, між анодом і катодом розміщений сепаратор [18–20].

2. Порівняння матеріалів і характеристик LiFePO_4 – і Na-Ion-акумуляторів представлено в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Порівняння матеріалів між LiFePO_4 -та Na-Ion-акумулятором

Тип	Натрій-іонний акумулятор Na-Ion	Літій-залізо-фосфатний акумулятор LiFePO_4
Матеріал катода	Шаруваті оксиди, прусська синь, поліаніони та ін.	Потрійні матеріали, літій-залізо-фосфат, літій-марганцевий оксид тощо.
Матеріал анода	Аморфний вуглець	Графіт
Електроліт	Гексафторфосфат натрію	Гексафторфосфат літію
Катодний струмоприймач	Алюмінієва фольга	Алюмінієва фольга
Анодний струмоприймач	Алюмінієва фольга	Мідна фольга
Сепаратор	PP/PE	PP/PE

На основі аналізу наданих таблиць можна зробити висновок, що акумулятори LiFePO_4 зазвичай володіють більшою щільністю енергії, що робить їх оптимальними для застосування, де важливі компактність і висока ємність [7; 37]. Натрієво-іонні акумулятори сьогодні відстають за цим показником, проте активно вдосконалюються [21; 22]. Очікується, що протягом наступних двох років їхня щільність енергії досягне рівня 160–180 Вт·год/кг, а через п'ять років – 200 Вт·год/кг, що дасть змогу зробити ці акумулятори конкурентоспроможними. Обидва типи акумуляторів здатні витримувати глибокий розряд без суттєвого впливу на ресурс, однак LiFePO_4 має деяку перевагу завдяки вищій стабільності.

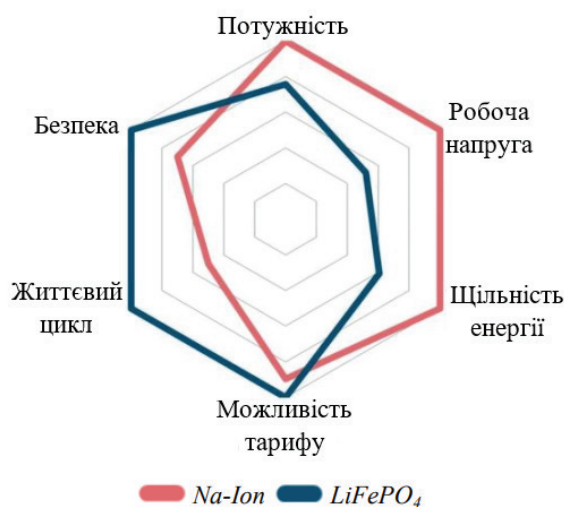
Щодо ефективності, то акумулятори LiFePO_4 характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії з мінімальними енергетичними втратами під час перетворення. Натрієво-іонні акумулятори все ще дещо відстають, але також демонструють позитивну динаміку в цьому напрямі.

Таблиця 2

Порівняння характеристик LiFePO_4 – і Na-Ion-акумуляторів

Специфікація акумуляторних батарей	Натрій-іонний акумулятор Na-Ion	Літій-залізо-фосфатний акумулятор LiFePO_4
Номинальна напруга	3,0 В	3,2 В
Робоча напруга	2,8–3,5 В	2,5–3,65 В
Щільність енергії на вагу	120–200 Вт·год/кг	150–220 Вт·год/кг
Щільність енергії на об'єм	180–280 Вт·год/л	200–350 Вт·год/л
Типовий термін служби циклів (80%)	1000–3000 циклів	3000–6000 циклів
Календарний термін експлуатації (80%)	15–20 років	8–10 років
-20°C коефіцієнт збереження ємності	>90%	60–70%
Температурний діапазон	-40°C to 60°C	-20°C to 50°C
Стійкість до надмірного розряду	0 В	2 В
Глибина розряду (ГР)	100%	100%
Швидкість заряджання	Заряджається до понад 80% за 15 хвилин при кімнатній температурі	Заряджання більш ніж на 80% за 45 хвилин при кімнатній температурі
Вартість	Низький	Високий
Тепловий розбіг	350 °C (662 °F)	270°C (518°F)
Максимальне безпечне заряджання	50–100%	100%
Безпека	Відсутність ризику термічного розбігу, нетоксичний	Може перегрітися і загорітися, нетоксичний
Вплив на навколишнє середовище та можливість переробки	Простий процес відновлення	Може знадобитися складне розділення металів
Ефект пам'яті	NONE	NONE

Акумулятори на основі літєвого залізо-фосфату (LiFePO_4) характеризуються значно довшим життєвим циклом із більшою кількістю циклів заряджання-розряджання до суттєвого зниження їхньої ефективності. Натомість натрієві акумулятори на даний момент не досягли таких показників, проте технологія постійно вдосконалюється, і з кожним роком кількість циклів заряджання-розряджання зростає [3; 23]. Водночас натрієві акумулятори демонструють перевагу за низьких температур, що робить їх оптимальним вибором для застосування у холодних кліматичних умовах. Акумулятори LiFePO_4 можуть зазнавати зниження продуктивності в таких умовах, що є їхнім суттєвим недоліком [24] (рис. 3).


Рис. 3. Порівняння Na-Ion- та LiFePO_4 -акумуляторів [25]

Однією з основних переваг натрієвих акумуляторів є значно нижча вартість натрію порівняно з літієм. Зокрема, дані з Шанхайського металургійного ринку демонструють значну різницю у ціні чистих сполук натрію та літію: карбонат натрію коштує близько \$290 за метричну тонну; карбонат літію (99,5% маси акумулятора) має значно вищу ціну – близько \$35 тис за метричну тонну, навіть після значного зниження цін із середини 2022 р.

Попит на натрій у виробництві акумуляторів на даний момент залишається обмеженим, особливо в контексті стрімкого зростання попиту на літій, який активно використовується у виробництві акумуляторів LiFePO_4 . Уже в 2022 р. ціни на літієві акумулятори вперше за 12 років зросли, досягнувши \$151 за кВт·год. Це відбулося через високий попит на акумуляторні батареї, викликаний електрифікацією пасажирського транспорту, виробництвом електричного промислового обладнання та створенням систем накопичення енергії.

Ці чинники свідчать про економічну привабливість натрієвих акумуляторів (Na-Ion) для енергетичних систем, особливо в умовах, коли вартість є визначальним фактором. Прогрес у технології виробництва та хімії клітин дав змогу значно знизити витрати на їх виготовлення. Водночас глобальні зусилля, спрямовані на зменшення споживання викопного палива, сприяли популяризації технології акумуляторів LiFePO_4 , яка стала основою для електрифікації мільярдів легкових та комерційних транспортних засобів.

Порівняння LiFePO_4 та Na-Ion, як показано на рис. 3, підкреслює різні переваги кожного типу катодного матеріалу. Na-Ion має вищу напругу елементів, щільність потужності та питому ємність, що надає йому суттєву перевагу в об'ємній щільності енергії. Це є важливим чинником для досягнення великих запасів ходу, що можуть зрівнятися з пробігом автомобілів, оснащених двигунами внутрішнього згоряння (наприклад, 1000 км на одному баку палива). Водночас LiFePO_4 відзначається довшим терміном служби, швидким заряджанням та підвищеною безпекою. Його нижчий ризик теплового розбігу у разі механічних пошкоджень робить LiFePO_4 особливо придатним для комерційних транспортних засобів із частими циклами заряджання (автобуси, навантажувачі та скутери), а також для стаціонарних систем зберігання енергії, що часто використовуються у поєднанні з відновлюваними джерелами енергії, як-от сонячні та вітрові електростанції.

Розглянемо практичні характеристики двох типів акумуляторів у форм-факторі 18650. Як прототипи використовуються акумулятори HAKADI Sodium Ion 18650 (3,1V, 1500 mAh) та LiFePO_4 BATTERY CELL 18650-3,2V-1600 mAh. Порівняння їхніх характеристик наведено на рис. 3. З аналізу характеристик видно, що LiFePO_4 має деяку перевагу перед Na-Ion за ємністю. Далі варто провести порівняння графіків розряду та заряджання цих пристроїв і здійснити їх тестування для більш детальної оцінки.

Із графіків на рис. 4–8 видно, що натрій-іонні акумулятори здатні розряджатися до нижчих напруг порівняно з акумуляторами на основі фосфату заліза (LiFePO_4) [15], зокрема до 1,55 В, при цьому демонструючи високий коефіцієнт посилення ємності. Водночас акумулятори LiFePO_4 можуть розряджатися лише до 1,95 В. Окрім цього, важливим є аналіз ефективності використання потужностей на різних етапах розряду.

Графіки свідчать про те, що натрій-іонні акумулятори характеризуються більш рівномірним розподілом ємності протягом розряду, тоді як акумулятори LiFePO_4 відзначаються помітним зниженням ємності на завершальних етапах розряду. Це свідчить про те, що, хоча акумулятори LiFePO_4 можуть мати вищу початкову ємність, їхня продуктивність на низьких рівнях заряду може бути нижчою, ніж у натрій-іонних акумуляторів.

Оскільки для нашого дослідження були використані акумулятори форм-фактора 18650, проведемо порівняння їх із літій-іонними акумуляторами того ж форм-фактора. Хімічний склад та конструктивні особливості цих пристроїв схожі, оскільки обидва типи використовують літій як основний компонент, що забезпечує високу енергетичну щільність. Натомість у натрій-іон-

них акумуляторах використовуються іони натрію, що сприяють більш швидкому процесу заряджання, але призводять до зниження енергетичної щільності через більший розмір іонів [1; 30].

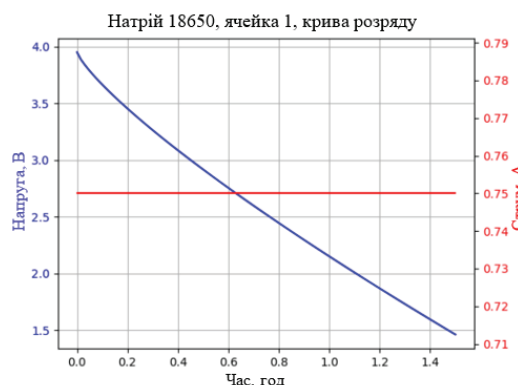


Рис. 4. Графік розряду Na-Ion- акумулятора

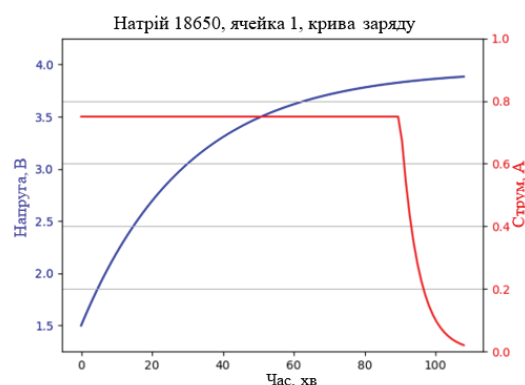


Рис. 5. Графік заряду Na-Ion- акумулятора

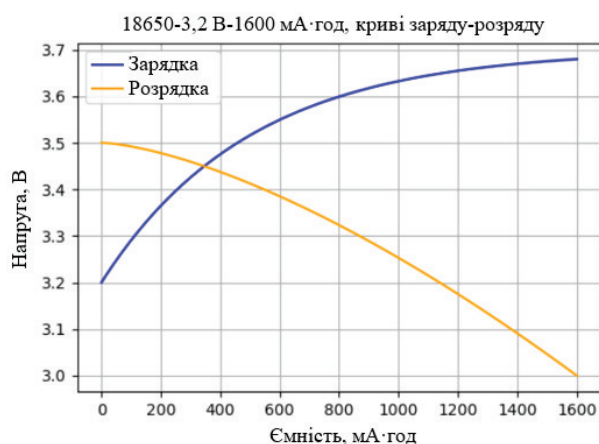


Рис. 6. Графіки заряду та розряду LiFePO_4 -акумулятора

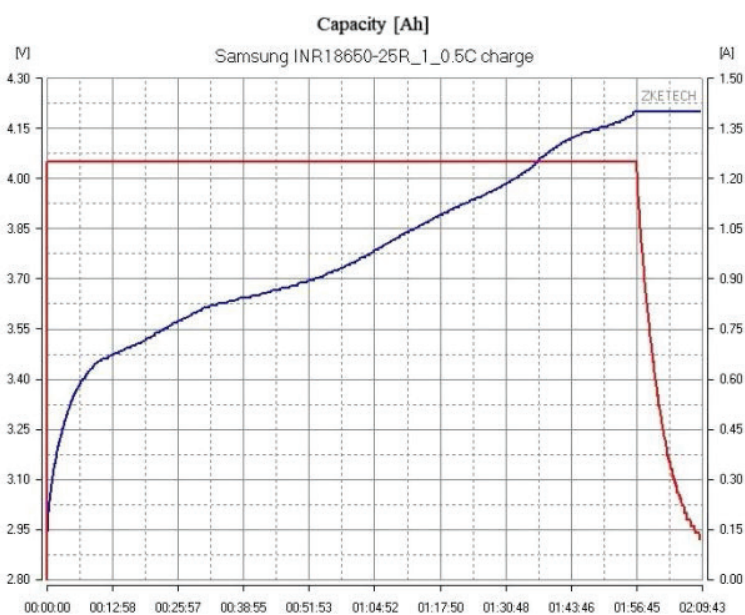


Рис. 7. Графіки зарядки акумулятора LiFePO_4

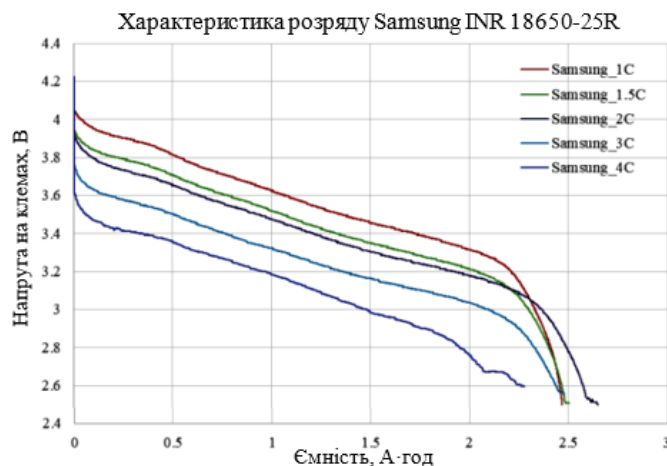


Рис. 8. Графіки розрядки акумулятора LiFePO_4

Конструктивно обидва типи акумуляторів мають анод, катод, електроліт та сепаратор. Водночас струмоприймачі натрій-іонних акумуляторів виготовляються з алюмінію, тоді як у літій-іонних акумуляторах використовують більш кошовну мідь. Із погляду екологічності натрій-іонні акумулятори є більш привабливими, оскільки натрій є доступнішим матеріалом, а також їх виробництво має менший негативний вплив на навколишнє середовище [4; 26]. Окрім того, натрій-іонні акумулятори є більш безпечними, оскільки не схильні до вибухів у разі перегріву, тоді як літій-іонні акумулятори вимагають більш ретельного контролю температури через ризик теплового розгону [31; 32].

Наступним етапом є аналіз практичних характеристик літій-іонних акумуляторів на прикладі моделі Samsung INR18650-25R 3,7 В 2500 мА·год [33–35]. На графіку, що наведений вище, можна спостерігати, що мінімальна напруга розряду для цього акумулятора становить 2,5 В. Він має рівномірний розподіл ємності подібно до натрій-іонних акумуляторів, але відрізняється від акумуляторів на основі літій-залізо-фосфату. Також на графіку зарядження до 4,2 В (рис. 7) відрізняється від заряджання натрій-іонного акумулятора до 3,95 В (рис. 5) і літій-залізо-фосфатного акумулятора до 3,65 В (рис. 6) у нашому випадку.

Ці дані підтверджують загальну тенденцію: літій-іонні акумулятори забезпечують високу енергетичну щільність, але потребують суворого контролю заряджання для запобігання деградації матеріалу. Натрій-іонні та літій-залізо-фосфатні акумулятори, своєю чергою, характеризуються дещо нижчою енергетичною щільністю, але виграють у плані довговічності та безпеки, що робить їх більш придатними для застосування в стаціонарних системах зберігання енергії.

Висновки. Натрій-іонні та LiFePO_4 -акумулятори мають свої унікальні переваги і недоліки, що визначає їх придатність для різних застосувань. Натрій-іонні акумулятори є більш економічно ефективним варіантом і забезпечують кращу продуктивність за низьких температур, тоді як LiFePO_4 -акумулятори мають вищу енергетичну щільність, більший термін служби та покращену безпеку. Вибір між цими технологіями залежить від конкретних вимог до застосування, таких як вартість, ефективність та екологічність. У майбутньому очікується подальше вдосконалення обох типів акумуляторів, що сприятиме розвитку більш універсальних і стійких рішень для зберігання енергії.

Список використаних джерел

1. Lakshmi G.S. Battery Energy Storage Technologies for Sustainable Electric Vehicles and Grid Applications. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1495. 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1495/1/012014>



2. Jamil M., Wei Sh., Taylor M.Ph., Chen J.J.J., Kennedy J.V. Hybrid Anode Materials for Rechargeable Batteries – A Review of Sn/TiO₂ Based Nanocomposites. *Energy Rep.* 2021. 7. 2836–2848. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.05.004>
3. Hannan M.A., Al-Shetwi A.Q., Begum R.A. Ker P.J., Rahman S.A., Mansor M., Mia M.S., Muttaqi K.M., Dong Z.Y. Impact assessment of battery energy storage systems towards achieving sustainable development goals. *Energy Storage.* 2021. 42. 103040. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103040>
4. Patel T. A Comparative Study of Lithium-ion and Sodium-ion Batteries: Characteristics, Performance, and Challenges. *Friedrich Alexander Universität Erlangen Nürnberg (FAU).* 2023. 14 March. <https://open.fau.de/handle/openfau/21891>
5. Shi N., Chen Z., Niu M., He Z., Wang Y., Cui J. State of charge estimation for the lithium-ion battery based on adaptive extended Kalman filter using improved parameter identification. *Energy Storage.* 2021. 45. 103518. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103518>
6. Belik M. Optimisation of energy accumulation for renewable energy sources. *Energy Power Qual. J.* 2021. 19. 205–210. <https://doi.org/10.24084/repqj19.258>
7. Martinko D., Medved D., Kolcun M., Mazur D. Planning of the Optimal Performance of Household Photovoltaics and Battery Storage within Consideration of Investment Return. *Przegląd Elektrotechniczny.* 2024. 100(1). 105–111. <https://doi.org/10.15199/48.2024.01.22>
8. Lezhniuk P., Buslavets O. Rubanenko O. Balancing electricity generation and consumption in a system with renewable energy sources. *2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 63–68. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570087>
9. Makovenko E. Single-phase three-level qZ-source inverter connected to the grid with battery storage and active power decoupling function. *59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 12–13 November 2018, 1–6. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2018.8659843>
10. Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. Mathematical modelling of cogeneration photoelectric module parameters for hybrid solar charging power stations of electric vehicles. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2022. 1–6. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397>
11. Al-Issa H.A., Qawaqzeh M., Kurashkin S., Halko S., Kvitka S., Vovk O., Miroshnyk O. Monitoring of power transformers using thermal model and permission time of overload. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE).* 2022. 12(3). 2323–2334. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2323-2334>
12. Qawaqzeh M., Dudnikov S., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Trunova I., Pazyi V., Danylchenko D., Halko S. Buinyi, R. Development of algorithm for the operation of a combined power supply system with renewable sources. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2022. 1–4. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916372>
13. Sodium Ion Batteries: Performance Advantages and Broad Application Prospects in Extreme Temperatures. <https://www.LiFePO4-battery.com/News/sodium-ion-batteries-advantages.html>
14. First Phosphate. How the LFP Battery Works <https://firstphosphate.com/phosphate-industry/about-the-lfpbattery/#:~:text=How%20the%20LFP%20Battery%20Works,than%20one%20negatively%20charged%20element>
15. Subramanyan K., Akshay M., Lee Y.S., Aravindan V. Fabrication of Na-Ion full-cells using carbon-coated Na₃V₂(PO₄)₂O₂F cathode with conversion type CuO nanoparticles from spent Li-Ion batteries. *Small Methods.* 2022. 6. 2200257. <https://doi.org/10.1002/smt.202200257>
16. Identifying the pinch points in the LFP supply chain. <https://firstphosphate.com/lfp-battery-strategy>
17. FutureBatteryLab. The big beginner's guide to Sodium-Ion batteries <https://futurebatterylib.com/the-big-beginners-guide-to-sodium-ion-batteries>
18. Rudola A., Rennie A.J.R., Heap R., Meysami S.S., Lowbridge A., Mazzali F., Sayers R., Wright C.J., Barker J. Commercialisation of high energy density sodium-ion batteries: Faradion's journey and outlook. *Mater. Chem. A.* 2021. 9. 8279–8302. <https://doi.org/10.1039/D1TA00376C>



19. Bazaluk, O., Struchaiev, N., Halko, S., Miroshnyk, O., Bondarenko, L., Karaiev, O., Nitsenko, V. Ways to improve the efficiency of devices for freezing of small products. *Materials*, 2022, 15(7), 2412. <https://doi.org/10.3390/ma15072412>
20. Bondarenko L., Halko S., Matsulevych O., Tetervak I., Vershkov O., Miroshnyk O., Nitsenko V., Havrysh V. The Experimental Research on Unit Operation for Fruit Crops' Bones Calibration. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023. 13(1). 21. <https://doi.org/10.3390/app13010021>
21. Kumar R., Goel V. A study on thermal management system of lithium-ion batteries for electrical vehicles: A critical review. *Energy Storage* 2023. 71. 108025. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108025>
22. Schwarz S. Lithium Iron Phosphate – enabling the future of individual electric mobility. 2022. <https://www.e-motec.net/lithium-iron-electric-mobility>
23. Sodium-Ion Battery Market <https://www.marketsandmarkets.com/MarketReports/sodium-ion-battery-market-207269067.html>
24. Battery Data online. <https://calce.umd.edu/battery-data#Storage>
25. Sayahpour B., Hirsh H., Parab S., Nguyen L.H.B., Zhang M. Meng Y.S. Perspective: Design of cathode materials for sustainable sodium-ion batteries. *MRS Energy Sustain.* 2022. 9. 183–197. <https://doi.org/10.1557/s43581-022-00029-9>
26. Na-Ion battery online. <https://www.hinabattery.com/en/index.php?catid=12>
27. Tabor S., Lezhenkin A., Halko S., Miroshnik A., Kovalyshyn S., Vershkov A., Hryhorenko O. Mathematical simulation of separating work tool technological process. *E3S Web of Conferences*, 2019, 132, 01025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913201025>
28. Lezhenkin O.M., Halko S.V., Miroshnyk O.O., Vershkov O.O., Lezhenkin I.O., Suprun O.M., Shchur T.G., Kruszelnick W., Kasner R. Investigation of the separation of combed heap of winter wheat. *Journal of Physics: International Conference on Applied Sciences*. 2021. 1781(1). 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012016>
29. Vovk O. Kvitka S., Halko S., Strebkov O. Energy-saving control of asynchronous electric motors of driving working machines. *Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations*. Cham: Springer International Publishing. 2019. 415–423. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_43
30. Bashir T. A review of the energy storage aspects of chemical elements for lithium-ion based batteries. *Energy Mater.* 2021. 1. 100019.
31. Mahto T., Mukherjee V. Energy storage systems for mitigating the variability of isolated hybrid power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. 51. 1564–1577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.012>
32. Dwornicka R., Pietraszek J. The outline of the expert system for the design of experiment. *Production Engineering*. 2018. 20. 43–48. <https://doi.org/10.30657/pea.2018.20.09>
33. Adaikkappan M., Sathiyamoorthy N. Modeling. State of charge estimation, and charging of lithium-ion battery in electric vehicle: A review. *Energy Res.* 2021. 46(5). 2141–2165. <https://doi.org/10.1002/er.7339>
34. Rudola A.: The Future of Clean Transportation: Sodium-ion Batteries. <http://www.bridgeindia.org.uk>.
35. Samsung INR18650-25R datasheet. <https://www.powerstream.com/p/INR18650-25R-datasheet.pdf>
36. Миколук О., Желавська І., Ляховець В. Формування ключових векторів забезпечення енергетичної безпеки крізь призму інноваційного розвитку альтернативних джерел енергії. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2018. № 3(1). С. 199–204. <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/6698>
37. Dali M., Belhadj J., Roboam X. Hybrid solar–wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: control and energy management – experimental investigation. *Energy*. 2010. 35. 2587–2595. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.005>
38. Mahto T., Mukherjee V. Energy storage systems for mitigating the variability of isolated hybrid power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. 51. 1564–1577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.012>
39. Luo Y., Shi L., Tu G. Optimal sizing and control strategy of isolated grid with wind power and energy storage system. *Energy Conversion and Management*. 2014. 80. 407–415. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.061>

Стаття надійшла до редакції 04.04.2025



R. Oksenyich¹, S. Halko², A. Sereda¹, S. Popadchenko¹, D. Zelenkov²

¹State Biotechnological University

²Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

COMPARATIVE ANALYSIS OF LITHIUM-IRON-PHOSPHATE AND SODIUM-ION ENERGY STORAGE DEVICES

Summary

Energy storage is the process of accumulating, releasing, and managing energy using storage devices. Today, this principle of energy storage is playing an important role in energy supply, as renewable sources become more and more responsible for energy production. Moreover, since it is not possible to regulate the amount of energy from renewable sources, it is necessary to store energy during periods of lower demand or higher production, from sources such as solar and wind energy. Over the past century, a wide range of energy storage technologies have been developed, from large-scale hydroelectric power plants to advanced electrochemical storage. Hydroelectric power plants remain the main method of long-term energy storage due to their high capacity and durability. At the same time, lithium-iron-phosphate and sodium-ion batteries open up new opportunities for energy storage at the local level, making them promising for integration into modern power systems. In addition, the efficient use of energy storage can minimize the risks of electricity shortages during critical periods and ensure the stability of the power system. This is achieved due to the ability of energy storage to effectively level the load, compensate for fluctuations in renewable energy generation, and provide reliable backup power. In particular, LiFePO_4 and Na-Ion technologies demonstrate high energy efficiency, which allows them to be integrated into various segments of the power system – from household devices to large-scale industrial plants. Their use also helps to reduce the carbon footprint of the energy sector, which is important for achieving sustainable development goals. In this paper, we compare two types of electrochemical storage devices – LiFePO_4 and Na-Ion. Particular attention will be paid to their durability, energy efficiency, materials from which they are made, and technical characteristics. Also, their economic feasibility and prospects for implementation in commercial and domestic applications will be assessed.

Keywords: sodium-ion batteries, lithium-iron-phosphate batteries, energy storage, charge monitoring.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-9>

УДК 621.311:621.311.25

Р. В. Оксенич¹, аспірант

ORCID: 0000-0002-6510-5108

О. О. Мірошник¹, докт. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6144-7573

О. М. Мороз¹, докт. техн. наук

ORCID: 0000-0002-8520-9211

С. В. Галько², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7991-0311

С. А. Попадченко¹, ст. викладач

ORCID: 0000-0003-2537-9769

¹Державний біотехнологічний університет, м. Харків²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

email: okrus785@proton.me

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ КУТА НАХИЛУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

Анотація. Генерація електроенергії за рахунок сонячних електростанцій значно зростає в усьому світі, тому вибір оптимального кута нахилу фотоелектричних модулів є важливою частиною проєктування сонячної електростанції. Це, своєю чергою, впливає на ефективність виробництва сонячної енергії, зменшуючи при цьому викиди парникових газів і знижуючи залежність від вичерпних видів палива, що використовуються на традиційних електростанціях, та спонукає до пошуку альтернативних способів виробництва електроенергії. Сьогодні сонячна енергетика стала одним із найвідоміших джерел виробництва електроенергії. Але варто пам'ятати, що кількість енергії, яку генерує фотоелектрична панель, напряму залежить від кількості вловленого сонячного випромінювання. Дане питання важливе як для домашніх сонячних електростанцій, так і для комерційних сонячних електростанцій.

Ключові слова: сонячна електростанція, фотоелектричний модуль, оптимальний кут нахилу, відновлювальна енергетика, сонячна інсоляція.

Постановка проблеми. Протягом дня сонце перебуває в різних точках неба. Ба більше, залежно від пори року воно піднімається на різну висоту над горизонтом. Звичайно, що за таких умов генерація енергії сонячними панелями постійно змінюється, тому важливо визначити оптимальний кут нахилу сонячних панелей для забезпечення найвищої ефективності.

З огляду на те, що кут нахилу фотоелектричної панелі може змінюватися залежно від місця установки. Ті сонячні фотоелектричні панелі, які спрямовані безпосередньо до сонця, будуть генерувати найбільшу кількість електроенергії [1; 2]. Оскільки сонце змінює своє положення протягом дня, воно може бути вище або нижче залежно від сезону і часу доби, тому фактичний кут неможливо зафіксувати. Щоб сонячна панель отримувала найбільше сонячного випромінювання протягом дня, необхідно спочатку визначити орієнтацію фотоелектричних панелей, а потім визначити кут нахилу, для якого зробити відповідні розрахунки. Ураховуючи, що сонячні панелі можуть генерувати найбільше енергії, коли вони розташовані під прямим кутом до променів сонця. Оптимальний кут сонячного опівдня перпендикулярний до сонячних променів [3–6].

Фотоелектричні панелі здебільшого встановлюються на дахах будинків або промислових приміщень, і немає ні технічної, ні фінансової можливості змінювати кут нахилу сонячної панелі протягом року [7–9]. Саме тому в цій статті ми розглянули питання вибору оптимального кута нахилу сонячної панелі для отримання максимальної кількості енергії протягом року [10–13]. Визначення правильного кута нахилу сонячних панелей дає змогу максимально збільшити ефективність генерації протягом року як для домашніх, так і для комерційних сонячних електростанцій.

Аналіз останніх досліджень. Сонячне випромінювання на похилій поверхні може бути визначене за допомогою різних математичних моделей. Ці моделі враховують прямі відбитий та розсіяний складники сонячного випромінювання. Методи розрахунку розсіяного випромінювання на похилій поверхні зазвичай поділяються на ізотропні та анізотропні моделі неба [4; 14]. Основна відмінність між цими двома типами полягає у припущеннях щодо розподілу розсіяного сонячного випромінювання. Ізотропна модель неба передбачає рівномірний розподіл випромінювання, тоді як анізотропна модель неба цього не передбачає [6; 15]. Однією з найбільш часто використовуваних моделей є ізотропна модель неба, розроблена Лю та Джорданом, яка описується такими рівняннями:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega + \left(\frac{\pi}{180^\circ} \right) \omega \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega + \left(\frac{\pi}{180^\circ} \right) \omega \sin \varphi \sin \delta}, \quad (1)$$

$$H_t = H \left(1 - \frac{H_d}{H} \right) R_p + H_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \rho, \quad (2)$$

де R_b – відношення середньомісячної радіації на нахиленій поверхні до середньомісячної радіації на горизонтальній поверхні;

φ – широта;

β – кут нахилу;

$$\omega = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta), \quad (3)$$

це годинний кут сонця в момент заходу над горизонтальною поверхнею,

$$\omega = \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta), \quad (4)$$

кут заходу сонця для похилої поверхні у Південній півкулі та Північній півкулі слід замінити з $(\varphi + \beta)$ на $(\varphi - \beta)$;

H_T – середня місячна добова сумарна радіація на похилій поверхні;

H – середня місячна добова сумарна радіація на горизонтальній поверхні;

H_d – середня місячна добова розсіяна радіація на горизонтальній поверхні;

ρ – коефіцієнт відбиття ($\rho = 0,2$).

Наведені рівняння слугують теоретичною основою для обґрунтування розрахунків сонячного випромінювання на похилих поверхнях, що є визначальним чинником у процесі оптимізації кута нахилу фотоелектричних панелей із метою підвищення їх ефективності [7; 16; 17]. Ізотропна модель Лю та Джордана отримала широке застосування завдяки простоті використання та стабільним результатам у різних умовах географічних широт, що забезпечує її застосування як базового методологічного інструменту у дослідженнях у галузі сонячної енергетики.

На основі дослідження Такура і Чандела, присвяченого оптимізації кутів нахилу для сонячної електростанції потужністю 190 кВт у населеному пункті Хаткар-Калані (Індія), було встановлено, що зміна кута нахилу сонячних панелей на місячній, сезонній та річній основі дає змогу максимізувати виробництво електроенергії. Зокрема, їхнє дослідження засвідчило суттєве збільшення генерації – до 25% на рік порівняно із СЕС із фіксованим кутом нахилу [18]. Оптимізація кута нахилу не лише сприяє підвищенню обсягів виробленої енергії, а й скорочує терміни окупності СЕС, що робить цей підхід економічно доцільним.

Ядав та Чандел здійснили дослідження з метою визначення оптимального кута нахилу (ОКН) сонячних панелей у населеному пункті Хамірпур (Індія) шляхом порівняльного аналізу різних моделей розрахунку дифузного сонячного випромінювання [19; 20]. Результати їхнього дослідження засвідчили, що модель є найбільш точною, оскільки похибка між прогнозованими

та експериментально отриманими значеннями сонячного випромінювання становила лише 4,5%. Такий високий рівень точності свідчить про надійність цієї моделі для оцінки сонячного випромінювання в даному регіоні.

Окрім того, встановлено, що для максимізації інсоляції азимутальний кут орієнтації сонячних панелей має становити від 10° до 20° . Додатково доведено, що встановлення сонячних панелей під кутом, який дорівнює географічній широті місця розташування, дає змогу підвищити ефективність перетворення сонячної енергії [21–24]. Ці результати свідчать про те, що застосування моделі Лю та Джордана у поєднанні з коригуванням азимутального кута та кута нахилу до рекомендованих значень забезпечує оптимальне функціонування сонячних енергетичних систем у Хамірпурі, сприяючи підвищенню ефективності генерації електроенергії.

Комплексна оцінка, проведена в межах дослідження, підкреслює важливість вибору точних моделей розрахунку та правильного орієнтування сонячних панелей для досягнення максимальної енергетичної віддачі. Упровадження оптимізованих параметрів налаштування дає змогу суттєво покращити показники роботи фотоелектричних систем, сприяючи підвищенню енергоефективності та сталому розвитку енергетичного сектору.

Формулювання мети статті. Метою дослідження є обґрунтування та розрахунок оптимального кута нахилу фотоелектричних панелей з урахуванням сезонних змін положення сонця та особливостей установа сонячних електростанцій.

Основна частина. Ефективність генерації електроенергії фотоелектричними модулями залежить не лише від щільності потоку сонячного випромінювання, а й від кута між сонцем і фотоелектричним модулем, тобто кута β . Коли кут β установлений так, що сонячні промені падають перпендикулярно на сонячну панель, щільність потоку максимальна, а отже, ефективність генерації енергії найвища. За зміни цього кута щільність потоку випромінювання, що падає на модуль, зменшується, оскільки частина випромінювання відбивається або не потрапляє на активну поверхню під потрібним кутом.

Розрахунок кута нахилу проведемо на прикладі міста Харків, яке розташоване за такими координатами: широта – 49.9946° , довгота – 36.2309° .

Цей приклад можна використати для будь-якої іншої локації для визначення оптимального кута нахилу сонячних панелей.

Для розрахунку інсоляції на сонячні панелі необхідно визначити основні сонячні кути, які показані на рис. 1.

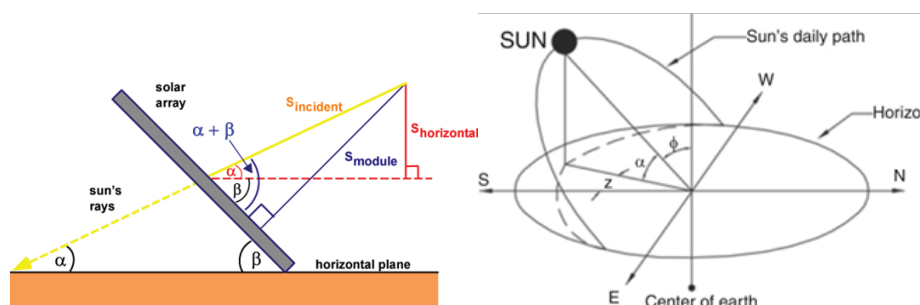


Рис. 1. Положення Сонця і сонячної панелі та основні кути

Кут нахилу сонячного модуля розраховується за формулою:

$$\beta = 90 - \alpha, \quad (6)$$

де α характеризує висоту сонця над горизонтальною площиною. У момент сходу Сонця цей кут становить 0° , тоді як у зенітному положенні він досягає 90° .

Далі, кут висоти для сонячного полудня:

$$\alpha = 90 - \varphi + \delta, \quad (7)$$

де φ – географічна широта місцевості, у нашому випадку $\varphi = 49.99$;

δ – кут нахилу сонця, тобто кут між екватором і уявною лінією, що з'єднує центр землі із центром сонця.

Нахил розраховується за формулою:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365}(284 + N)\right), \quad (8)$$

де N – номер дня.

Як приклад розглянемо розрахунок кута нахилу фотоелектричної панелі для січня:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365}(284 + 15)\right) = -21.269,$$

$$\alpha = 90 - 49.99 + (-21.269) = 18.74^{\circ},$$

$$\beta = 90 - 18.74 = 71.25^{\circ}.$$

Розрахунки за цілий рік наведено в табл. 1 та представлено на рис. 2–4 у вигляді графіків.

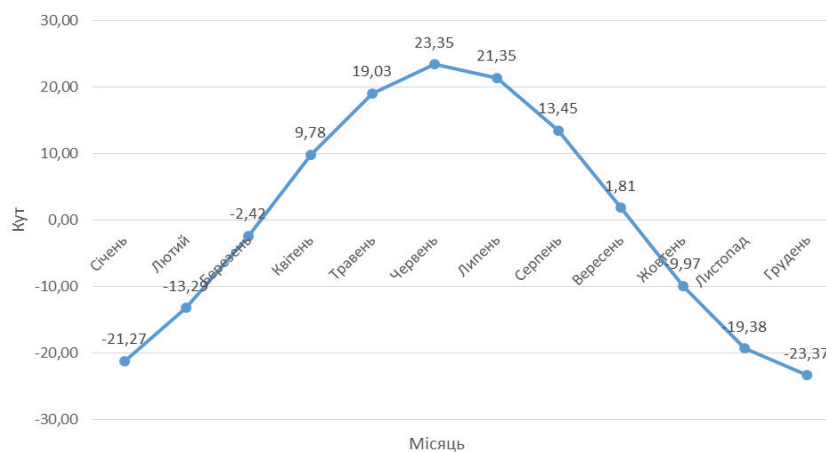


Рис. 2. Кут нахилу Сонця δ

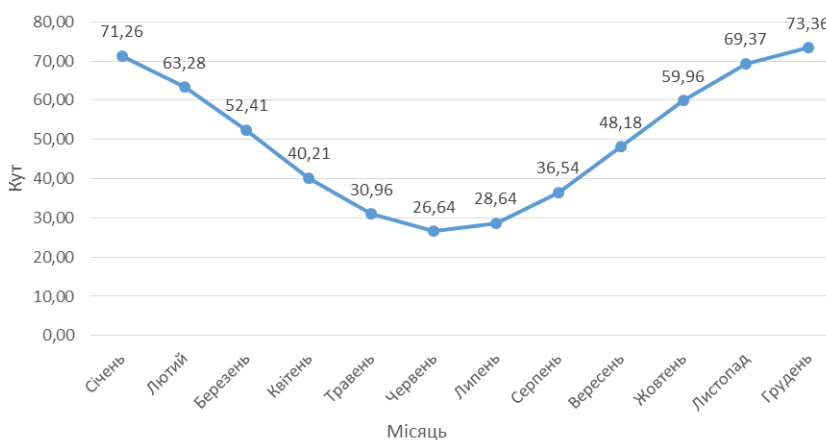


Рис. 3. Залежність кута нахилу сонячних панелей від місяця

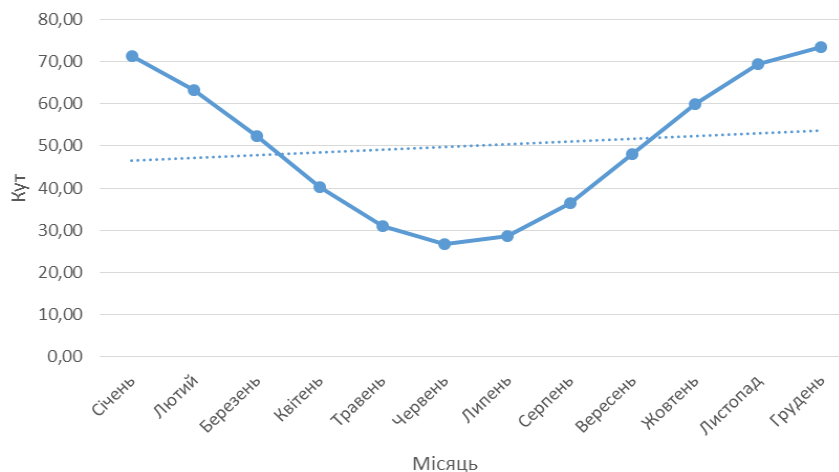


Рис. 4. Кут нахилу сонячної панелі

Таблиця 1

Оптимальний кут нахилу фотоелектричного модуля та кут нахилу сонця для кожного місяця

Місяць	N	α	δ	β
Jan	15	18,74	-21,27	71,26
Feb	46	26,72	-13,29	63,28
Mar	75	37,59	-2,42	52,41
Apr	106	49,79	9,78	40,21
May	136	59,04	19,03	30,96
June	167	63,36	23,35	26,64
July	197	61,36	21,35	28,64
Aug	228	53,46	13,45	36,54
Sep	259	41,82	1,81	48,18
Oct	289	30,04	-9,97	59,96
Nov	320	20,63	-19,38	69,37
Dec	350	16,64	-23,37	73,36

За результатами розрахунків виберемо середньорічне значення, для цього скористаємося формулою:

$$\beta_{year} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \beta_i, \quad (9)$$

де β_i – сума всіх кутів за рік:

$$\beta_{year} = \frac{1}{12} \cdot 600.78 = 50.07.$$

На основі результатів розрахунків ми визначили, що середній річний кут нахилу сонячних панелей становить для міста Харків приблизно $\beta = 50,07^\circ$. З урахуванням цього приймаємо кут нахилу $\beta = 50^\circ$. Цей кут забезпечить оптимальну ефективність сонячної електростанції протягом року з урахуванням змін сезонів.

Висновки. Результати досліджень показують, наскільки вагомим є вибір оптимального кута нахилу сонячних панелей залежно від пори року. Це один із найважливіших аспектів під час проєктування сонячних електростанцій, оскільки він впливає на ефективність виробництва сонячної енергії та допомагає зменшити викиди парникових газів.



На прикладі міста Харкова ми проаналізували зміни положення сонця та розраховали кути нахилу сонячних панелей для кожного місяця. Це дало змогу отримати середньорічний кут нахилу $\beta = 50^\circ$.

Отримані результати можна застосувати до інших локацій, вибравши відповідні координати для розрахунків. Це дасть змогу оптимізувати генерацію сонячної енергії, а також сприятиме ефективному використанню ресурсів та переходу на екологічно чисту генерацію енергії.

Список використаних джерел

1. Akhlaghi S. Study of sufficient number of optimal tilt angle adjustment to maximize residential solar panels yield. *2017 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*. Champaign, IL, USA, 2017. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PECI.2017.7935747>
2. Yunus Khan T.M. Optimum location and influence of tilt angle on performance of solar PV panels. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. 141. 511–532. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09089-5>
3. Hua Y., He W., Liu P. Optimum tilt angles of solar panels: A case study for Gansu province, northwest China. *Applied Solar Energy*. 2020. 56. 388–396. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20050060>
4. Portolan dos Santos I., Rüther R. Limitations in solar module azimuth and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in Brazil. *Renewable Energy*. 2014. 63. 116–24. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.008>
5. Dyadenchuk A. Simulation of solar element characteristics based on porous silicon. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. 2022. 1–4. <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005773>
6. Optimal Tilt Angle Determination for PV Panels Using Real Time Data Acquisition. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7408049/> (дата звернення: 23.04.2025).
7. Rusheng T., Tong W.U. Optimum tilt angle for solar collectors used in China. *Applied Energy*. 2004. 79(3). 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.01.003>
8. Thakur V., Chandel S.S. Maximizing the solar gain of a grid-interactive solar photovoltaic power plant. *Energy Technology*. 2013. 1. 1–8. <https://doi.org/10.1002/ente.201300118>
9. Herrera-Romero J.V. Estimation of the optimum tilt angle of solar collectors in Coatzacoalcas Veracruz. *Renewable Energy*. 2020. 153. 615–623. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.045>
10. Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Influence of temperature on energy performance indicators of hybrid solar panels using cylindrical cogeneration photovoltaic modules. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 132–136. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569975>
11. Yadav P., Chandel S.S. Comparative analysis of diffused solar radiation models for optimum tilt angle determination for Indian locations. *Applied Solar Energy*. 2014. 50(1). 53–59. <https://doi.org/10.3103/S0003701X14010137>
12. Pandey C.K., Katiyar A.K. A comparative study of solar irradiation models on various inclined surfaces for India. *Applied Energy*. 2011. 88. 1455–1459. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.028>
13. Halko S., Halko K. Research of electrical and physical characteristics of the solar panel on the basis of cogeneration photoelectric modules. *Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial: Colección de documentos científicos «ΑΙΟΓΟΣ» con actas de la Conferencia Internacional Científica y Práctica*, 24 de abril de 2020. Barcelona, España: Plataforma Europea de la Ciencia. 2020. 2. 39–44
14. Savchenko O., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Sereda A., Dudnikov S., Kozlovskiy O., Buinyi R., Halko S. Improving the Efficiency of Solar Power Plants Based on Forecasting the Intensity of Solar Radiation Using Artificial Neural Networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 137–140. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009>
15. Dudnikov S., et al. Methodological aspects of evaluating the effectiveness of using local energy systems with renewable sources. *E3S Web Conf.* 2020. 154. 07013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015407013>
16. Al Issa H.A., et al. Correct Cross-Section of Cable Screen in a Medium Voltage Collector Network with Isolated Neutral of a Wind Power Plant. *Energies*. 2021. 14. 3026. <https://doi.org/10.3390/en14113026>
17. Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. Mathematical Modelling of Cogeneration Photoelectric Module Parameters for Hybrid Solar Charging Power Stations of Electric Vehicles. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week)*, Kharkiv, Ukraine. 2022 1–6. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397>

18. Iegorov O., et al. A calculated determination and experimental refinement of the optimal value of the single-phase induction motor transformation ratio. *Energetika*. 2021. 67. 1–2. <https://doi.org/10.6001/energetika.v67i1.4483>
19. Komada P., et al. The incentive scheme for maintaining or improving power supply quality. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2019. 95(5). 79–82. <https://doi.org/10.15199/48.2019.05.20>
20. Qawaqzeh M., Dudnikov S., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Trunova I., Pazyi V., Danylchenko D., Halko S., Buinyi R. Development of algorithm for the operation of a combined power supply system with renewable sources. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2022. 1–4. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916372>
21. Trunova I. The perfection of motivational model for improvement of power supply quality with using the one-way analysis of variance. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. 6. 163–168. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/24>
22. Guo M., Zang H.X., Gao S.Y., Chen T.J., Xiao J., Cheng L.X., Wei Z.N., Sun G.Q. Optimal tilt angle and orientation of photovoltaic modules using HS algorithm in different climates of China. *Appl. Sci*. 2017. 7. 1028. <https://doi.org/10.3390/app7101028>
23. Herrera-Romero J.V., Colorado-Garrido D., Escalante Soberanis M.A., Flota-Banuelos M. RETRACTED: Estimation of the optimum tilt angle of solar collectors in Coatzacoalcas, Veracruz, *Renewable Energy*. 2019. 153. 615–623.
24. Benghanem M. Optimization of tilt angle for solar panels: Case study for Madinah, Saudi Arabia. *Appl. Energy*. 2011. 88. 1427–1433.

Стаття надійшла до редакції 06.05.2025

R. Oksenysh¹, O. Miroshnyk¹, O. Moroz¹, S. Halko², S. Popadchenko¹

¹State Biotechnological University

²Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE TILT ANGLE OF PHOTOVOLTAIC PANELS

Summary

Electricity generation from solar power plants is growing significantly worldwide, so choosing the optimal tilt angle of photovoltaic modules is an important part of designing a solar power plant. This, in turn, affects the efficiency of solar energy production, while reducing greenhouse gas emissions and reducing dependence on exhaustible fuels used in traditional power plants. And it encourages the search for alternative methods of electricity production. Today, solar energy has become one of the most famous sources of electricity production. But it is worth remembering that the amount of energy generated by a photovoltaic panel directly depends on the amount of captured solar radiation. This issue is important for both home solar power plants and commercial solar power plants. During the day, the Sun is at different points in the sky. Moreover, depending on the season, it rises to different heights above the horizon. Of course, under such conditions, energy generation by solar panels is constantly changing. Therefore, it is important to determine the optimal tilt angle of solar panels to ensure the highest efficiency. Given that the angle of inclination of the photovoltaic panel can vary depending on the installation location.

In order for the solar panel to receive the most solar radiation during the day, it is necessary to first determine the orientation of the photovoltaic panels, and then determine the angle of inclination for which to make the appropriate calculations. Given that solar panels can generate the most energy when they are located directly towards the Sun. The optimal angle of solar noon is perpendicular to the sun's rays. The purpose of this study is to substantiate and calculate the optimal angle of inclination of photovoltaic panels, taking into account seasonal changes in the position of the Sun and the features of the installation of solar power plants. Since determining the correct angle of inclination of solar panels allows you to maximize the generation efficiency throughout the year for both home and commercial solar power plants.

Keywords: solar power plant, photovoltaic module, optimal tilt angle, renewable energy, solar insolation.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-10>

УДК 621.315.23:62-97

І. М. Трунова¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7510-4291

А. І. Середа¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-7670-6822

О. А. Савченко¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6401-0852

С. В. Галько², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7991-0311

С. А. Попадченко¹, ст. викладач

ORCID: 0000-0003-2537-9769

¹Державний біотехнологічний університет, м. Харків²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

email: trunova_iryna@btu.kharkov.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ЖИЛИ КАБЕЛЮ

Анотація. Частка кабельних ліній в Україні має тенденцію до збільшення по відношенню до повітряних ліній, у тому числі внаслідок прагнення захистити електромережі від наслідків ракетних обстрілів. При цьому існують певні чинники, які впливають на їхню надійність. Експлуатаційна надійність кабельних ліній закладається ще на етапі проектування та виробництва. Будь-яка ізоляція в процесі експлуатації має тепловий знос, що й зумовлює, як правило, певний строк служби таких ліній. У статті визначено впливові експлуатаційні чинники зміни температури жили кабелю. Запропоновано рекомендації щодо використання комп'ютерних технологій для дослідження в експлуатаційних умовах узагальненої математичної моделі зміни температури жили кабелю з метою подальшого коригування тривало допустимих струмових навантажень (або застосування інших заходів для зменшення нагріву кабелю).

Ключові слова: кабельна лінія, температура жили, тривало допустиме навантаження, експлуатаційні умови, комп'ютерні технології.

Постановка проблеми. У сучасних системах електропостачання використовуються повітряні (ПЛ) та кабельні (КЛ) лінії електропередач, які найбільш розповсюджені у країнах ЄС, при цьому їхня частка в електромережах напругою до 100 кВ включно за даними [1] становить 50% від довжини ПЛ. Частка КЛ в Україні має також тенденцію до збільшення по відношенню до ПЛ, у тому числі внаслідок прагнення захистити електромережі від наслідків ракетних обстрілів. При цьому існують певні чинники, які впливають на надійність КЛ. Експлуатаційна надійність КЛ закладається ще на етапі проектування та виробництва. Наприклад, розробки нових видів ізоляційного покриття, зокрема кабелів із ізоляцією зі зшитого поліетилену, рекомендують до використання завдяки низьким діелектричним втратам, великій пропускній здатності, високій стійкості у разі короткого замикання, відповідно, надійності в експлуатації, стійкості до пошкоджень, менших витрат на реконструкцію. Однак будь-яка ізоляція в процесі експлуатації має тепловий знос, що й зумовлює, як правило, певний строк служби КЛ. Під час експлуатації для підвищення надійності КЛ контролюють температуру жили кабелю, виконуючи певні виміри, розрахунки та порівняння їхніх результатів із нормами, та приймають відповідні технічні заходи у разі необхідності. Тому питання дослідження математичної моделі зміни температури жили кабелю, зокрема з використанням комп'ютерних технологій, є актуальним.

Аналіз останніх досліджень. Технічний стан електроенергетичного обладнання є основою надійного електропостачання споживачів [2–4]. При цьому забезпечення справного технічного стану ізоляції – одне з головних завдань експлуатаційного персоналу, відповідно до вимог нор-

мативних документів, зокрема [5–7], встановлено гранично допустимі температури нагріву (трансформаторної оливи, електродвигунів, проводів ПЛ тощо). І хоча в багатьох дослідженнях [8–10] зроблено висновок про більшу надійність КЛ порівняно з ПЛ, але проблема дотримання певних температурних режимів КЛ також є. У стандарті [11] наведено алгоритм визначення температури жили кабелю залежно від багатьох експлуатаційних чинників, таких як робочий струм, питомий тепловий опір ґрунту, виміряна температура безпосередньо на бронестрічці (оболонці або шланзі) кабелів тощо. Відповідно, для прийняття заходів із покращення температурного режиму КЛ необхідне використання цього алгоритму з багатьма ітераціями, наприклад досліджуючи, як вплине зміна ґрунту з кращими показниками теплопровідності на ділянці КЛ, де ґрунт має ці показники дуже низькі, або як вплине зміна навантаження тощо [22–24]. Питанням застосування комп'ютерних технологій в організації експлуатації та дослідженням технічного стану електроенергетичного обладнання присвячено багато статей, зокрема [12; 13; 25], де робиться висновок про доцільність використання комп'ютерних технологій для реалізації складних алгоритмів розрахунків, для обробки великих масивів даних, для вибору довідникових даних. У [14; 26; 27] згадувалася розроблена комп'ютерна програма, яка дала змогу автоматизувати процес урахування багатьох чинників для визначення температури жили кабелю та порівняння її з допустимими значеннями, але не приведено математичну модель, яка досліджується за допомогою вказаної комп'ютерної програми, та не приведено пояснення багатьох можливостей цієї програми.

Формулювання мети статті. Розроблення рекомендацій щодо застосування комп'ютерних технологій для дослідження розробленої математичної моделі зміни температури жили кабелю залежно від впливових експлуатаційних чинників.

Основна частина. Насамперед, надійність КЛ забезпечується дотриманням режимів використання, своєчасними роботами технічної експлуатації, випробуваннями КЛ та вимірюваннями необхідних параметрів [28; 29]. Наприклад, розглянемо такий захід, як дотримання допустимих навантажень, що зумовлено необхідністю недопущення перевищення певних температурних режимів задля забезпечення тривалого строку служби ізоляції кабелю. Згідно зі стандартом [11], існують рекомендації щодо коригування цього параметру (тривало допустимих струмових навантажень) унаслідок того, що розрахункові умови можуть відрізнятися від фактичних.

Однак спочатку слід зауважити, що існує багато параметрів для визначення тривало допустимих навантажень навіть за розрахункових умов [15; 16], таких як прокладання одного кабелю в траншеї на глибині 0,7–1 м за температури ґрунту 15°C і питомого теплового опору $120^{\circ}\text{C}\cdot(\text{см}/\text{Вт})$. Щоб скористатися таблицями стандарту [11] для вибору цього експлуатаційного параметру (тривало допустимого струмового навантаження, що визначено за розрахункових умов), необхідна така інформація:

- матеріал жили (мідь, алюміній);
- вид ізоляції (паперова просочена, збідніло-просочена ізоляція в спільній свинцевій або алюмінієвій оболонці, окремо освинцьована мідними та алюмінієвими жилами зі збідніло-просоченою ізоляцією, окремо освинцьована мідними та алюмінієвими жилами з паперовою просоченою ізоляцією, пластмасова ізоляція тощо);
- середовище, де прокладається кабель (ґрунт, вода, повітря);
- переріз жили (6, 10, 16, 25, 35, 50, 70, 95, 120, 150, 185, 240 мм^2);
- кількість жил у кабелі (1, 2, 3, 4);
- напруга (до 1, до 3, 6, 10, 20, 35 кВ).

Вибране розрахункове значення тривало допустимого навантаження кабелю за цими вихідними даними підлягає сезонному коригуванню внаслідок того, що температура навко-

лишнього середовища відрізняється від розрахункової (за сезонного коригування враховують липневу температуру та грудневу і використовують певні коефіцієнти в розрахунку навантаження) [30; 31]. Також використовують певні коефіцієнти, що враховують кількість поруч прокладених кабелів у землі та фактичний тепловий опір ґрунту, який визначають для ділянки з найгіршими умовами охолодження [17; 18; 32]. Умови охолодження кабелів погіршуються у разі їх прокладання в трубах довжиною понад 10 м під землею (також у цьому разі іпадку слід зменшувати розрахункове навантаження, використовуючи певний коефіцієнт) [33–35].

Розглянемо приклад розрахунку тривалого допустимого навантаження для кабелю з просоченою паперовою ізоляцією на номінальну напругу 10 кВ із мідними жилами, що прокладений у землі. Приймаємо інші вихідні дані для розрахунку:

- переріз жили – 50 мм²;
- кількість жил – 3;
- кабель прокладений у Харківській області;
- у траншеї прокладено паралельно три однакові кабелі з відстанню у світлі 200 мм;
- питомий тепловий опір ґрунту – 150°C·(см/Вт).

Загальний порядок дій розрахунку тривалого допустимого навантаження кабелю такий:

1) визначаємо за даними табл. 3 [11] тривало допустиму температуру нагріву жили цього кабелю 60°C;

2) згідно з табл. А.1.1 [11], тривало допустимі струмові навантаження, що визначені для номінальних умов температури ґрунту 15°C та питомого теплового опору ґрунту 120°C·(см/Вт), становлять $I_{ном}=180$ А;

3) визначаємо за табл. 6 [11], що Харківська область – це Північний регіон із середньою температурою ґрунту влітку 20°C, в осінньо-зимовий сезон – 10°C, тобто поправочний коефіцієнт за табл. Б.2 [11] має бути:

- для літнього сезону – $k_1=0,94$;
- для зимового сезону – $k_1=1,06$;

4) згідно з табл. Б.1 [11], поправочний коефіцієнт на кількість прокладених кабелів в одній траншеї – $k_2=0,87$;

5) згідно з табл. В.2 [11], поправочний коефіцієнт залежно від питомого теплового опору ґрунту – $k_3=0,93$;

6) відповідно, загальний вираз для визначення тривало допустимого струмового навантаження за таких умов

$$I_{дон} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot I_{ном}, \quad (1)$$

звідси

- для літнього періоду:

$$I_{дон} = 0,94 \cdot 0,87 \cdot 0,93 \cdot 180 = 137 \text{ А};$$

- для зимового періоду:

$$I_{дон} = 1,06 \cdot 0,87 \cdot 0,93 \cdot 180 = 154 \text{ А}.$$

Відповідно, використання комп'ютерних технологій буде значно полегшувати і вибір необхідних табличних даних (за умови їх завантаження, наприклад, в електронні таблиці Microsoft Excel) [36–38], і подальший розрахунок коригованого тривало допустимого струмового навантаження залежно від змін впливових чинників.

Коли в процесі експлуатації КЛ виникає необхідність контролювати дійсну температуру нагріву жили кабелю, то це робиться вимірюванням безпосередньо температури на броне-

стрічці (оболонці або шланзі) кабелів [39–41], а потім визначають температуру жили кабелю за певним алгоритмом, де враховуються багато чинників [19–21].

Узагальнена математична модель для дослідження в експлуатаційних умовах зміни температури жили кабелю з метою подальшого коригування тривало допустимих струмових навантажень (або застосування інших заходів для зменшення нагріву кабелю) має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \vartheta_{жс} &= f(\vartheta_{бр}, I_{досл}, n, \rho_{20}, T_k, K_p, S, \alpha, \vartheta_{дон}, \vartheta_{нс}), \\ \vartheta_{жс} &< \vartheta_{дон}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де $\vartheta_{бр}$ – температура бронестрічки (оболонки) кабелю, що виміряна, °C;

$I_{досл}$ – тривале максимальне навантаження кабелю, що виміряне, А;

n – кількість жил кабелю;

ρ_{20} – питомий електричний опір жили кабелю, Ом·мм²/см;

T_k – сума теплових опорів ізоляції і захисних покривів кабелю, °C·(см/Вт);

S – переріз жили кабелю, мм²;

K_p – поправочний коефіцієнт для приведення електричного опору до розрахункової температури (у разі прокладки у повітрі – 1,02; у землі – 0,98);

α – температурний коефіцієнт опору струмовідної жили, °C⁻¹;

$\vartheta_{дон}$ – тривало допустима температура нагрівання жил, °C;

$\vartheta_{нс}$ – температура навколишнього середовища, що виміряна, °C.

Для дослідження математичної моделі (2) була розроблена комп'ютерна програма в електронних таблицях Microsoft Excel. Для ілюстрації використовувалися вихідні дані, що приведені вище і показані на рис. 1.

C18		fx =C16+C17								
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
Умовне позначення	Показник	Значення								
Im	тривале максимальне навантаження кабелю, що виміряне, А	154								
n	кількість жил кабелю	3								
	питомий електричний опір жили кабелю, Ом·мм²/см (для міді									
ρ	17,93·10 ⁻³ ; для алюмінію – 29,4·10 ⁻³)	0,0001793								
Tk	сума теплових опорів ізоляції і захисних покривів кабелю, °С·(см/Вт)	91								
S	переріз жили кабелю, мм²	50								
	поправочний коефіцієнт для приведення електричного опору до розрахункової температури (у разі прокладки у повітрі – 1,02; у землі – 0,98)	0,98								
Kp	температурний коефіцієнт опору струмовідної жили, °С ⁻¹ (для міді 0,0039; для алюмінію 0,0040)	0,0039								
α										
θдоп	тривало допустима температура нагрівання жил, °С	60								
θнаск.сеп.	температура навколишнього середовища, що виміряна під час дослідів, °С	27								
θбр	виміряна температура на бронестрічці (оболонці або шланзі) кабеля, °С	33								
Δθ	різниця температури між бронестрічкою (оболонкою або шлангом) кабелю і жилами кабелю, °С	25,68								
θжс	температура жили кабелю, °С	58,68								

$$\Delta \vartheta = \frac{I_{доп}^2 \cdot n \cdot \rho_{20} \cdot T_k \cdot K_p}{S} \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta_{доп} - \vartheta_{наск.сеп.})]$$
$$\vartheta_{жс} = \vartheta_{бр} + \Delta \vartheta$$

Рис. 1. Скріншот із вихідними даними та результатами розрахунків під час визначення температури жили кабелю

Окрім того, на рис. 1 показано результат розрахунку спочатку різниці температури між бронестрічкою (оболонкою або шлангом) кабелю і жилами кабелю в осередку C17 за аналітичною формулою, що показана правіше, а в осередку C18 – кінцевий результат розрахунку температури жили кабелю.

На прикладі визначення суми теплових опорів ізоляції і захисних покривів кабелю T_k (°C·(см/Вт)) проілюструємо можливість застосування електронних таблиць для використання довідникових даних стандарту [11]. Для цього була попередньо занесена інформація табл. К.1 з [11] до

електронних таблиць Microsoft Excel. На рис. 1 в осередку C10 показано результат розрахунку суми теплових опорів ізоляції і захисних покривів кабелю, а фрагмент комп'ютерної програми з логічною функцією вибору потрібних довідникових даних «ЕСЛИ» показано на рис. 2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
10	<i>T_k</i>	сума теплових опорів ізоляції і захисних покривів кабелю, °C·(см/Вт)	=ЕСЛИ(C11=C23;(C28+C29);ЕСЛИ(C11=D23;(D28+D29);ЕСЛИ(C11=E23;(E28+E29);ЕСЛИ(C11=F23;(F28+F29);ЕСЛИ(C11=H23;(H28+H29);ЕСЛИ(C11=I23;(I28+I29);ЕСЛИ(C11=J23;(J28+J29);ЕСЛИ(C11=K23;(K28+K29);(L28+L29))))))))))									
20												
21												
22	Напруга кабелю, кВ	Шар	Теплові опори ізоляції кабелів з перерізом жили, мм ²									
23			16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
28	10	Ізоляція	101	89	82	72	66	57	51	47	43	37
29		Зовнішні покриви	25	24	20	19	18	18	17	17	15	15

Рис. 2. Фрагмент комп'ютерної програми з логічною функцією вибору потрібних довідникових даних «ЯКЩО»

Під час вимірів температури на оболонці кабелю дуже зручно використовувати цю комп'ютерну програму для точних та швидких розрахунків, навіть у польових умовах, із використанням смартфона, завантаживши файл із програмою. На рис. 3 показано скріншот екрану смартфона з результатом розрахунку. У режимі «Правка» можна змінювати результати вимірів тривалого максимального навантаження кабелів, температури навколишнього середовища та температури на бронестрічці (оболонці або шланзі) кабелю і, таким чином, отримувати негайно результати вимірювань. Також можна коригувати інші вихідні дані, наприклад кількість жил кабелю, поправочний коефіцієнт для приведення електричного опору до розрахункової температури (у програмі використовувався коефіцієнт для кабелів, що прокладені у ґрунті), температурний коефіцієнт опору струмовідної жили (у програмі використовувався коефіцієнт для міді), питомий електричний опір жили кабелю (у програмі використовувався коефіцієнт для міді), тривало допустима температура нагрівання жил (хоча для цього параметру можна також застосувати логічну функцію «ЕСЛИ» для вибору табличних даних, попередньо завантаживши їх до електронних таблиць).

Лист1	Лист2	Лист3	...
7	тривале максимальне навантаження кабелю, що виміряне, А	154	
8	кількість жил кабелю	3	
9	питомий електричний опір жили кабелю, Ом·мм ² /см (для міді 17,93·10 ⁻⁵ ; для алюмінію – 29,4·10 ⁻⁵)	0,0001793	
10	сума теплових опорів ізоляції і захисних покривів кабелю, °C·(см/Вт)	91	
11	переріз жили кабелю, мм ²	50	
12	поправочний коефіцієнт для приведення електричного опору до розрахункової температури (у разі прокладки у ґрунті)	0,98	
13	температурний коефіцієнт опору струмовідної жили, °C ⁻¹ (для міді 0,0039; для алюмінію 0,0040)	0,0039	
14	тривало допустима температура нагрівання жил, °C	60	
15	температура навколишнього середовища, що виміряна під час дослідів, °C	27	
16	виміряна температура на бронестрічці (оболонці або шланзі) кабелю, °C	33	
17	різниця температури між бронестрічкою (оболонкою або шлангом) кабелю і жилами кабелю, °C	25,68	
18	температура жили кабелю, °C	58,68	

Рис. 3. Скріншот екрану смартфона з комп'ютерною програмою розрахунку в електронних таблицях Microsoft Excel температури жили кабелю під час вимірювань

Також для зручності в електронних таблицях Microsoft Excel можна запрограмувати зміну кольору клітинки з результатом розрахунку (якщо розрахункова температури жили кабелю перевищує максимально допустиму). Для цього використовується функція «Умове форматування» (Conditional formatting) з опцією «Формат користувача».

Висновки. Приведені рекомендації щодо використання комп'ютерних технологій для дослідження в експлуатаційних умовах узагальненої математичної моделі зміни температури жили кабелю значно зменшать трудомісткість розрахунків та дадуть змогу оперативно коригувати струмові навантаження (або застосовувати інші заходи для зменшення нагріву кабелю).

Список використаних джерел

1. Kalt G., Thunshirn P., Haberla H. A global inventory of electricity infrastructures from 1980 to 2017: Country-level data on power plants, grids and transformers. [Electronic Resource]. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8441158/> (accessed on 17.04.2025). <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107351>
2. Pazyi V., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Savchenko O., Halko S. Analysis of Technical Condition Diagnostics Problems and Monitoring of Distribution Electrical Network Modes from Smart Grid Platform Position. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2020. 57–60. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250080>
3. Al Issa H.A. Databases Case Study in Substantiation of Reconstruction of Power Distribution Networks Objects. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine. 2021. 1–6, <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598684>
4. Trunova I., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Pazyi V., Sereda A., Halko S., Buinyi R. The substantiation of reconstruction of power distribution networks objects. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 126–131. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570107>
5. Правила улаштування електроустановок. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
6. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Харків : Форт, 2017. 376 с.
7. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020. Київ : ПАТ «НЕК «Укренерго», 2020. 243 с.
8. Berdishev A., Taslimov A., Melikuziev B., Bijanov A. Reliability indicators of 10 kV cable lines in rural areas. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 869 (July 2020). 022005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/2/022005>
9. L̆vovs A., Friedite I. Reliability cost/worth assessment of distribution network formed by underground cables and overhead lines. *Case study of Latvia. ENERGETIKA*. 2015. T. 61. Nr. 1. 1–11. <https://doi.org/10.6001/energetika.v61i1.3091>
10. Zviedritis M., Gavrilovs A., Kutjuns A. Power supply reliability vs. profitability in rural distribution networks. *Proceedings of Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*, Rakvere, 11–13 June 2014. 335–340. <https://doi.org/10.1109/PQ.2014.6866836>
11. Експлуатація силових кабельних ліній напругою до 35 кВ. Інструкція: СОУ-Н МПЕ 40.1.20.509:2005. Київ : ГРІФРЕ, 2005. 125 с.
12. Бондаренко А.В., Трунова І.М. Цифровізація обліку технічного стану повітряних ліній електропередачі. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених «ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СУЧАСНОМУ СВІТІ»*, 2024. URL: <https://biotechuniv.edu.ua/nauka/konferentsiyi/> (дата звернення: 22.04.2024).
13. Трунова І.М., Пазій В.Г., Лотоцький Я.В. Аналіз використання комп'ютеризованих систем керування технічним сервісом електрообладнання АПК. *Зб. наук. праць VI Міжнародної науково-технічної конференції «Електроенергетика, електромеханіка та технології АПК»*. Харків : ДБТУ, 2023. 39–40.
14. Мартишко А.С., Трунова І.М. Експлуатаційні дослідження температури нагріву жили кабелю. *Матеріали XIX Міжнародного форуму молоді «Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті»*, 2023. URL: <https://btu.kharkov.ua/novini/mizhnarodnyj-forum-molodi-molod-i-industriya-4-0-v-xxi-storichchi/> (дата звернення: 17.04.2025).

15. Vovk O., Kvitka S., Halko S., Strebkov O. Energy-saving control of asynchronous electric motors of driving working machines. *Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations*. Cham: Springer International Publishing. 2019. 415–423. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_43
16. Savchenko O., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Sereda A., Dudnikov S., Kozlovskiy O., Buinyi R., Halko S. Improving the efficiency of solar power plants based on forecasting the intensity of solar radiation using artificial neural networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 137–140. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009>
17. Alrefo I.F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. 4. 82–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>
18. Trunova I. The Motivational Model for Improvement of Electricity Supply Continuity in Post-War Ukraine. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2023. 1–6. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312937>
19. Типові технологічні карти на капітальний ремонт та технічне обслуговування електричних мереж напругою 0,4-20 кВ: СОУ-Н МПЕ 40.1.20.663:2005. Київ : М-во палива та енергетики України, 2005. 167 с.
20. Визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередач: СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-82:2013. Київ : М-во палива та енергетики України, 2013. 61 с.
21. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги живлення в електричних мережах загального призначення. Замість ДСТУ EN 20160:2010; вхідні дані 20.05.2014. Київ : Міністерство економічного розвитку України. 2014. 32 с.
22. Assad U., Hassan M.A.S., Farooq U., Kabir A., Khan M.Z., Bukhari S.S.H, Jaffri Z.A., Oláh J., Popp J. Smart grid, Demand Response and Optimization: A Critical Review of Computational Methods. *Energies*. 2022. 15. 2003. <https://doi.org/10.3390/en15062003>
23. Perninge M., Soder L. A Stochastic Control Approach to Manage Operational Risk in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2012. 27(2). 1021–1031. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2174165>
24. Al-Quraan T.M.A., Vovk O., Halko S., Kvitka S., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko, V., Zayed N.M., Islam A. Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear. *Inventions*. 2022. 7(4). 92. <https://doi.org/10.3390/inventions7040092>
25. Samadi P. Advanced Demand Side Management for the Future Smart Grid Using Mechanism Design. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. 3. 1170–1180. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2203341>
26. Al-Issa H.A., Qawaqzeh M., Kurashkin S., Halko S., Kvitka S., Vovk O., Miroshnyk O. Monitoring of power transformers using thermal model and permission time of overload. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022. 12(3). 2323–2334. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2323-2334>
27. Suslov K., Solonina N., Gerasimov D. Assessment of an impact of power supply participants on power quality. *18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Ljubljana, Slovenia. 2018. 1m5. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378836>
28. Miroshnuk O.O., Tymchuk S.O. Uniform distribution of loads in the electric system 0.38/0.22 kV using genetic algorithms. *Technical Electrodynamics*. 2013. 4. 67m73. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84885913005&partnerID=MN8TOARS>
29. Tymchuk S., Shendryk S., Shendryk V., Panov A., Kazlauskaitė A., Levytska T. Decision-Making Model at the Management of Hybrid Power Grid. In: Lopata A., Butkienė R., Gudonienė D., Sukackė V. (eds) *Information and Software Technologies. ICIST 2020. Communications in Computer and Information Science*. 2020. 1283. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59506-7_6
30. Lezhenkin O., Halko S., Miroshnyk O., Vershkov O., Lezhenkin I., Suprun O., Shchur T., Kruszelnicka W., Kasner R. Investigation of the separation of combed heap of winter wheat. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1781. 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012016>
31. Verrelli C.M., Tomei P. Adaptive learning control for nonlinear systems: A single learning estimation scheme is enough. *Automatica*. 2023. 149. 110833.
32. Castro J.R., Saad M., Lefebvre S., Asber D., Lenoiret L. Coordinated Voltage Control in Distribution Network with the Presence of DGs and Variable Loads Using Pareto and Fuzzy Logic. *Energies*. 2016. 9. 107. <https://doi.org/10.3390/en9020107>

33. Al_Issa, H.A., Qawaqzeh M., Khasawneh A., Buinyi R., Bezruchko V., Miroshnyk O. Correct Cross-Section of Cable Screen in a Medium Voltage Collector Network with Isolated Neutral of a Wind Power Plant. *Energies*. 2021. 14. 3026. <https://doi.org/10.3390/en14113026>
34. Панов А.О. Розробка алгоритму регулювання сталого відхилення напруги в розподільчих мережах 0,4-10 кВ. *Всеукр. наук.-практ. конф. випускників вищих навчальних закладів та молодих вчених*. Харків : ХНАДУ. 2021. 170–174.
35. Панов А.О., Тимчук С.О. Модель регулювання показників якості електроенергії в розподільчих мережах 0,4–10 кВ. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2023. № 2. С. 13–23. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2023.275897>
36. Trunova I., Miroshnyk O., Savchenko O., Moroz O. The perfection of motivational model for improvement of power supply quality with using the one-way analysis of variance. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. 6. 163–168. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/24>
37. Bazaluk O., Struchaiev N., Halko S., Miroshnyk O., Bondarenko L., Karaiev O., Nitsenko V. Ways to improve the efficiency of devices for freezing of small products. *Materials*. 2022. 15(7). 2412. <https://doi.org/10.3390/ma15072412>
38. Khasawneh A., Qawaqzeh M., Kuchanskyy V., Rubanenko O., Miroshnyk O., Shchur T., Drechny M. Optimal Determination Method of the Transposition Steps of an Extra-High Voltage Power Transmission Line. *Energies*. 2021. 14(20). 6791. <https://doi.org/10.3390/en14206791>
39. Tabor S., Lezhenkin A., Halko S., Miroshnik A., Kovalyshyn S., Vershkov A., Hryhorenko O. Mathematical simulation of separating work tool technological process. *E3S Web of Conferences*. 2019. 132. 01025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913201025>
40. Wu J., Cui P. Cooperative Adaptive Fuzzy Control for the Synchronization of Nonlinear Multi-Agent Systems under Input Saturation. *Mathematics*. 12(10). (2024). 1426. <https://doi.org/10.3390/math12101426>
41. Chen C.L.P., Ren C.E., Du T. Fuzzy observed-based adaptive consensus tracking control for second-order multiagent systems with heterogeneous nonlinear dynamics. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 2015. 24. 906–915.

Стаття надійшла до редакції 19.04.2025

I. Trunova¹, A. Sereda¹, O. Savchenko¹, S. Halko², S. Popadchenko¹

¹State Biotechnological University

²Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

RESEARCH OF A MATHEMATICAL MODEL OF TEMPERATURE CHANGE IN THE CORE OF CABLE

Summary

The share of cable lines in Ukraine tends to increase in relation to overhead lines, including due to the desire to protect power grids from the consequences of missile attacks. At the same time, there are certain factors that affect their reliability. The operational reliability of cable lines is laid down at the design and production stage. Any insulation during operation has thermal wear, which causes, as a rule, a certain service life of such lines. During operation, to increase the reliability of cable lines, the temperature of the cable core is controlled, performing certain measurements, calculations and comparison of their results with the standards, and appropriate technical measures are taken if necessary. The article identifies the influential operational factors of changes in the temperature of the cable core.

An example of calculating the long-term permissible load for a cable with impregnated paper insulation for a rated voltage of 10 kV with copper conductors, which is laid in the ground, is considered. Recommendations for the use of computer technologies for the study of a generalized mathematical model of changes in the temperature of the cable core in operational conditions are proposed for the purpose of subsequent adjustment of long-term permissible current loads (or the use of other measures to reduce cable heating). For its study, a computer program in Microsoft Excel spreadsheets has been developed, which is convenient to use for accurate and fast calculations, even in the field using a smartphone, by downloading a file with the program.



Using a computer program, the result of calculating the temperature difference between the armored tape (sheath or hose) of the cable and the cable cores is given. On the example of determining the sum of thermal resistances of insulation and protective covers of the cable, the possibility of using spreadsheets for the use of reference data of the standard is illustrated.

Keywords: cable line, temperature, long-term permissible load, operational, computer technology.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-11>

УДК 621.3.045.53

І. М. Трунова¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7510-4291

А. І. Середа¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-7670-6822

О. А. Савченко¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6401-0852

С. А. Попадченко¹, ст. викладач

ORCID: 0000-0003-2537-9769

С. В. Галько², канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-7991-0311

¹Державний біотехнологічний університет, м. Харків²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: trunova_iryana@btu.kharkov.ua

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА МОДЕЛЬ КАПІТАЛЬНОГО РЕМОНТУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ІЗ ЗАМІНОЮ ОБМОТОК

Анотація. Запропоновано вдосконалення оптимізаційної моделі визначення технічних характеристик силового трансформатора під час капітального ремонту із заміною обмоток шляхом виявлення найбільш впливових чинників на результат оптимізації. Розроблено техніко-економічну модель капітального ремонту силового трансформатора із заміною обмоток на основі багатокритеріальної оптимізації, а саме з групами цільових функцій: за конструктивними критеріями; за технічними критеріями (втратами неробочого ходу та короткого замикання); за економічними критеріями, зокрема з використанням строку окупності інвестицій. Приведено приклад апробації запропонованої техніко-економічної моделі капітального ремонту силового трансформатора із заміною обмоток із використанням комп'ютерних технологій.

Ключові слова: багатокритеріальна оптимізація, техніко-економічні показники, ремонт, обмотки трансформатора, комп'ютерні технології.

Постановка проблеми. Ефективна робота енергетичного обладнання є основою енергетичної безпеки [1; 2], яка неможлива без значної уваги до технічного стану обладнання [3; 4], до реконструкції та модернізації обладнання [5–7]. Найбільш відповідальними об'єктами розподільних мереж є силові трансформатори, відмова яких призводить до значних економічних збитків, зокрема, окрім наслідків перерв в електропостачанні, ще й тому, що їхня вартість може становити (залежно від потужності) майже половину вартості трансформаторної підстанції [8; 9]. Відповідно, велика увага приділяється своєчасному виявленню та усуненню дефектів, не допускаючи їхнього розвитку до відмови силових трансформаторів [10;11]. Однак і внаслідок певних технологічних порушень, і внаслідок ракетних обстрілів існують відмови силових трансформаторів, зокрема з пошкодженням обмоток [12–14]. У планах розвитку Операторів систем розподілу (ОСР) на основі якісної оцінки технічного стану об'єктів розподільних мереж, згідно з [15–17], плануються роботи з усунення дефектів, реконструкції та модернізації обладнання, до яких відносяться і роботи з капітального ремонту (КР) силових трансформаторів, зокрема із заміною обмоток [18]. Тому у разі, коли залишився неушкодженим магнітопровід, але є необхідність заміни обмоток, необхідно провести відповідні розрахунки та визначити конструктивні розміри обмоток і технічні характеристики, які будуть у відремонтованого трансформатора, урахувуючи певні вимоги стандарту [19] щодо їх можливих відхилень та новий сучасний сортамент обмоткових проводів, що є на ринку відповідної продукції. Однак також є важливим обґрунтування і економічних показників КР силового трансформатора із заміною обмоток, оскільки, наприклад, можна вибрати той чи інший обмотковий провід, що впливатиме не лише на технічні характеристики, а й на економічні показники ремонту [20; 21].



Також, можливо, КР із заміною обмоток може виявитися економічно недоцільним порівняно з придбанням нового трансформатора. Тому вдосконалення оптимізаційної моделі КР силового трансформатора із заміною обмоток є актуальним.

Формулювання мети статті. Метою дослідження є вдосконалення оптимізаційної моделі КР ремонту силового трансформатора із заміною обмоток. Для досягнення вказаної мети поставлене завдання – розробити техніко-економічну модель КР силового трансформатора на основі багатокритеріальної оптимізації.

Аналіз останніх досліджень. Питанням оптимізації технічних та конструктивних параметрів електротехнічного обладнання присвячено багато публікацій, зокрема [22–25]. Під час конструювання обмоток силового трансформатора для певного магнітопроводу використовують відомі типові методики, що приведені, наприклад, у [26; 27], та орієнтуються на вимоги нормативних документів, зокрема ті, що вказані у [19] стосовно допустимих відхилень технічних характеристик (утрат неробочого ходу, утрат короткого замикання тощо). Тобто проектують нову обмотку, при цьому внаслідок можливості використання комп'ютерних розрахунків для виконання багатьох ітерацій із різними змінними даними силовий трансформатор може отримати покращені технічні характеристики з новою обмоткою, що виконана сучасним проводом. Про відповідну математичну модель згадувалося у [28–30], при цьому можна відзначити, що, по-перше, необхідно більш детально проаналізувати групи параметрів оптимізації для виявлення найбільш впливових чинників на результат розрахунків. По-друге, ця оптимізаційна модель спрямована лише на пошук найбільш оптимальних технічних характеристик, при цьому, можливо, у математичному моделюванні КР силового трансформатора із заміною обмоток доцільно враховувати і техніко-економічні показники, які також базуються на певних нормативно-технічних документах, таких як [32–34].

Основна частина. Існують певні технічні та конструктивні параметри силового трансформатора, які перед початком його КР задані:

S_n – номінальна потужність трансформатора, кВ·А;

$U_{ВН}, U_{НН}$ – номінальна вища напруга (ВН) та нижча напруга (НН);

K – коефіцієнт трансформації за паспортними даними трансформатора;

P_0 – втрати неробочого ходу (н. х.) за паспортними даними трансформатора, Вт;

P_K – втрати короткого замикання (к. з.) за паспортними даними трансформатора, Вт;

u_k – напруга к. з. за паспортними даними трансформатора, %;

i_0 – струм н.х. за паспортними даними трансформатора, %;

$D_{ст}$ – діаметр, описаний навколо стрижня, мм;

A, B – ширина та глибина стрижня (а також кількість і розміри ступенів стрижня та аналогічні розміри ярма), мм;

C – міжосьова відстань, мм;

h_{cm} – висота стрижня, мм тощо.

Також існує група параметрів для перевірки на відповідність вимогам [8], це такі параметри, як:

$K_p = \frac{W_{внIII}}{W_{нн}}$ – розрахунковий коефіцієнт трансформації (для трансформаторів із коефіцієнтом трансформації фазних напруг 3 та менше, а також на неосновному відгалуженні допустимі відхилення $\pm 1,0\%$, а для всіх інших трансформаторів – на основному відгалуженні $\pm 0,5\%$ [19]);

P_{op} – розрахункові втрати н. х., Вт (граничне відхилення $+15\%$ [19]);

P_{kp} – розрахункові втрати к. з. на основному відгалуженні, Вт (граничне відхилення для всіх дво- та триобмоткових трансформаторів та для основної пари обмоток триобмоткових авто-

трансформаторів +10%; для неосновних пар обмоток триобмоткових автотрансформаторів – +20% [19]);

u_{kp} – розрахункова напруга к. з., % (граничні відхилення $\pm 10\%$ [19]);

i_{0p} – розрахунковий струм н. х., % (граничне відхилення +30% [19]).

Група параметрів, що визначаються перевіркою можливості розміщення обмоток у вікні магнітопроводу без порушення вимог щодо ізоляційних відстаней, а саме:

h_{HH} та h_{BH} – дійсна висота обмотки НН та ВН, мм (має бути менша за орієнтовно визначені h'_{HH} та h'_{BH} з урахуванням певних ізоляційних відстаней);

параметр, що визначається перевіркою можливості розміщення обмоток у вікні магнітопроводу за умовою

$$C - D_{зов}^{BH} \geq \delta_{11}, \quad (1)$$

де $D_{зов}^{BH}$ – зовнішній діаметр обмотки ВН, мм;

δ_{11} – ізоляційна відстань між обмотками ВН суміжних стрижнів, мм.

Звідси, техніко-економічна модель КР силового трансформатора із заміною обмоток матиме вигляд (вирази (2) – (7)):

– цільові функції за конструктивними критеріями:

а) для проводу круглого перерізу з діаметром d :

$$d_i \in D; d_i \rightarrow d_{opt}, \quad (2)$$

б) для проводу прямокутного перерізу з розмірами $w \times l$:

$$w_i \times l_i \in W \times L; w_i \times l_i \rightarrow w_{opt} \times l_{opt}; \quad (3)$$

– цільові функції за технічними критеріями:

$$P_{opi} \in P; P_{op\ opt} = P_{op\ min} \quad (4)$$

$$P_{Kpi} \in P_{Kp}; P_{Kp\ opt} = P_{Kp\ min}; \quad (5)$$

– цільова функція за економічними критеріями (наприклад, із використанням строку окупності інвестицій T_o):

$$T_{oi} \in T; T_{oi} \rightarrow T_{o\ min}; \quad (6)$$

– обмеження:

Вираз (7) справедливий у частині, що стосується втрат короткого замикання, для всіх дво- та триобмоткових трансформаторів та для основної пари обмоток триобмоткових автотрансформаторів (для неосновних пар обмоток триобмоткових автотрансформаторів $\left(\frac{P_{Kp} - P_K}{P_K}\right) \leq 0,2$).

Розглянемо приклад апробації запропонованої техніко-економічної моделі КР силового трансформатора ТМ-40/10 із заміною обмоток. А саме: на етапі конструювання обмотки ВН вибір проводу виконуємо, використовуючи каталожні дані щодо продукції одного з провідних постачальників мідного та алюмінієвого дроту в Україні та Європі [34], зокрема, ПЕВТЛ-1-200, сортамент діаметрів якого від 0,16 мм до 2,5 мм. На рис. 1 приведено фрагмент результатів автоматизованого визначення декількох значень діаметру проводу (із загального масиву діаметрів) на певному етапі розрахунків. Осередки з проміжними результатами розрахунків та для діаметрів від 0,16 до 0,8 мм, де не виконується вимога щодо граничних утрат к. з., скриті. Зеленим кольором висвітлено рядки з результатами розрахунків для діаметрів проводів, що задовольняють таким вимогам приведеної моделі, як:

$$\left. \begin{aligned} h_{\text{HH}} &\leq h'_{\text{HH}}, h_{\text{BH}} \leq h'_{\text{BH}}; \\ C - D_{\text{ЗОВ}}^{\text{BH}} &\geq \delta_{11}; \\ \left(\frac{P_{\text{оп}} - P_0}{P_0} \right) &\leq 0,15; \\ \left(\frac{P_{\text{кр}} - P_{\text{к}}}{P_{\text{к}}} \right) &\leq 0,1; \\ -0,005 &\leq \left(\frac{K_{\text{р}} - K}{K_{\text{р}}} \right) \leq 0,005, K > 3; \\ -0,01 &\leq \left(\frac{K_{\text{р}} - K}{K_{\text{р}}} \right) \leq 0,01, K \leq 3; \\ -0,3 &\leq \left(\frac{i_{\text{оп}} - i_0}{i_0} \right) \leq 0,3; \\ -0,1 &\leq \left(\frac{U_{\text{кр}} - U_{\text{к}}}{U_{\text{к}}} \right) \leq 0,1. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

- обмеження щодо ізоляційних відстаней $h_{\text{BH}} \leq h'_{\text{BH}}$ та $C - D_{\text{ЗОВ}}^{\text{BH}} \geq \delta_{11}$;
- обмеження щодо вимог [19] стосовно граничного відхилення розрахункових утрат к. з. на основному відгалуженні $\left(\frac{P_{\text{кр}} - P_{\text{к}}}{P_{\text{к}}} \right) \leq 0,1$.

Умовним форматуванням автоматично висвітлено червоним кольором результати розрахунків, які не відповідають зазначеним обмеженням. Таким чином, на цьому етапі визначені п'ять діаметрів проводу ПЕВТЛ-1-200 (1,06 мм; 1,12 мм; 1,18 мм; 1,25 мм та 1,4 мм). У подальших розрахунках цей перелік може скоротитися до єдиного проводу з оптимальним діаметром $d_{\text{опт}}$.

Техніко-економічні розрахунки, окрім витрат на той чи інший провід, мають ураховувати, наприклад, почасову оплату праці робітників і, відповідно, час, що ними витрачається [31]. Згідно з [33], заміну обмоток при КР силового трансформатора виконує бригада електрослюсарів з одного електрослюсаря 4-го розряду та одного електрослюсаря 3-го розряду протягом 44,9 год. Згідно з [34], демонтаж та монтаж силового трансформатора виконують електромонтер 4-го розряду та електромонтер 2-го розряду протягом 2,5 год. Також для цього використовується машина бригадна (1,25 маш. год) та кран на автомобільному ходу (0,51 маш. год).

У [30] вказана вартість 1 маш. год (хоча сьогодні цей стандарт чинний, однак вартісні показники необхідно враховувати сучасні з урахуванням інфляції). Після КР із заміною обмоток електромонтер 6-го розряду та електромонтер 3-го розряду виконують випробування силового трансформатора протягом 23,5 год (перелік випробувань та норми часу приведені в [35; 36]). Таким чином, капітальні витрати становитимуть витрати на зарплату, на витратні матеріали, на використання машини та крану, на провід [37–39]. Вартість проводів залежить від ваги про-

	A	G	J	N
183	Ø, мм	$h_{\text{BH}} \leq h'_{\text{BH}}$	$C - D_{\text{ЗОВ}}^{\text{BH}} \geq \delta_{II}$	Перевірка умови за стандартом [6]
184		$h'_{\text{BH}} - h_{\text{BH}}$	$C - D_{\text{ЗОВ}}^{\text{BH}} - \delta_{II}$	$\left(\frac{P_{\text{кр}} - P_{\text{к}}}{P_{\text{к}}}\right) \leq 0,1$
213	0,8	8,61	26,42	0,61
214	0,85	31,21	23,97	0,47
215	0,9	14,63	22,37	0,35
216	0,95	-2,95	20,68	0,25
217	1	18,75	18,36	0,16
218	1,06	0,42	16,37	0,07
219	1,12	18,05	13,73	-0,01
220	1,18	1,58	11,75	-0,07
221	1,25	14,15	8,79	-0,13
222	1,32	-3,28	6,48	-0,19
223	1,4	7,60	3,20	-0,24
224	1,5	10,89	-0,78	-0,29
225	1,6	-9,61	-3,98	-0,34
226	1,7	-4,96	-7,96	-0,37
227	1,8	-0,88	-11,88	-0,40
228	1,9	3,31	-15,87	-0,43
229	2	5,85	-19,79	-0,45
230	2,12	6,98	-24,41	-0,47
231	2,24	-10,82	-28,25	-0,49
232	2,36	-11,34	-32,88	-0,51
233	2,5	-12,50	-38,08	-0,52

Рис. 1. Фрагмент результатів проміжного етапу визначення $d_{\text{опт}}$

воду (тобто конструктивних розмірів), хоча в межах сортаменту відрізняється незначно. Тому в даному прикладі слід обрахувати строк окупності інвестицій як для КР трансформатора, так і на встановлення нового трансформатора та порівняти отримані результати, зробивши висновок щодо доцільності КР силового трансформатора із заміною обмоток, використовуючи вибраний провід оптимального діаметру, що дасть змогу отримати оптимальні технічні характеристики трансформатора (у разі кращих, аніж у стандартного трансформатора, це також можна врахувати у техніко-економічних розрахунках).

Висновки. Приведена техніко-економічна модель КР силового трансформатора із заміною обмоток на основі багатокритеріальної оптимізації може бути корисною для обґрунтування доцільності та забезпечення якісного ремонту пошкоджених обмоток за справного магнітопроводу для подальшої ефективної експлуатації відремонтованого обладнання.

Список використаних джерел

1. Redko K., Borychenko O., Chernyavskiy A., Sayenko V., Dudnikov S. Comparative analysis of innovative development strategies of the fuel and energy complex of Ukraine and EU countries: international experience. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2023. 13(2). 301–308. <https://doi.org/10.32479/ijeep.14035>
2. Korchevoi Y. State and prospects of solid fuel energy development of Ukraine. Heat energy – new challenges of the time. Lviv: Ukrainian Technologies Fund. 2009. 29–35.
3. Fialko. N. Environmental aspects of heat recovery systems of boiler plants. *E3S Web of Conf*. 2019. 10010. art. 00015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910000015>.
4. Миколюк О., Желавська І., Ляховець В. Формування ключових векторів забезпечення енергетичної безпеки крізь призму інноваційного розвитку альтернативних джерел енергії. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2021. 24(1). 10–15.

кого національного університету. *Економічні науки*. 2018. 3(1). С. 199–204. <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/6698>

5. Al Issa H.A., et al. Databases Case Study in Substantiation of Reconstruction of Power Distribution Networks Objects. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine. 2021. 1–6. <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598684>

6. Trunova I., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Pazyi V., Sereda A., Halko S., Buinyi R. The Substantiation of Reconstruction of Power Distribution Networks Objects. *2021 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 126–131. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570107>

7. Al-Issa H.A., Qawaqzeh M., Kurashkin S., Halko S., Kvitka S., Vovk O., Miroshnyk O. Monitoring of power transformers using thermal model and permission time of overload. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022. 12(3). 2323–2334. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2323-2334>

8. Krasnozhon A.V., Buinyi R.O., Dihtyaruk I.V., Kvytsynskyi A.O. The investigation of distribution of the magnetic flux density of operating two-circuit power line 110 kV «CHTPP-Chernihiv-330» in the residential area and methods of its decreasing to a safe level. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. 6. 55–62. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.6.08>

9. Zamulko A., Chernetska Y. Benchmarking method for analyzing the efficiency of the electricity distribution system operators. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2018. 3. 35–44. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2018.164264>

10. Ikonnikova S., Schlüter A., Brandner B. The Rising Role of Prosumers in the Energy System/ 2022. 255–269. <https://doi.org/10.3139/9783446471757.018>

11. Medved' D., Kolcun M., Pavlik M., Bena L., Mester M. Analysis of Prosumer Behavior in the Electrical Network. *Energies*. 2021. 14. <https://doi.org/10.3390/10.3390/en14248212>

12. Josep Franklin Sihite. Failure Analysis of Power Transformer Based on Fault Tree Analysis. Kyoto University. 2013. <https://doi.org/10.14989/DOCTOR.K17885>

13. Matukhno V., Baidak Yu., Tomlein P. Thermal subsystem of voltage distribution transformer. *Refrigeration Engineering and Technology*, 2016. 52(6). 58–64.

14. Dwarakesh K., Jeyasekar C. Design and Implementation of Low-cost Remote Monitoring of Distribution Transformer with Consumer wise Energy recording, Load control & Power theft detection using Internet of Things. *IJAREE*, July 2018, 1(1). 71–79.

15. Трунова І.М., Дишлевський А.В., Куліш Л.О. Вдосконалення методики обґрунтування реконструкції об'єктів розподільних мереж. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Енергетика, надійність та енергоефективність»*. 2020. № 1(1). 84–88. <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2020.01.12>

16. Al-Quraan T.M.A., Vovk O., Halko S., Kvitka S., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V., Zayed N.M., Islam A. Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear. *Inventions*. 2022. 7. 92. <https://doi.org/10.3390/inventions7040092>

17. Методичні вказівки з обліку та аналізу в енергосистемах технічного стану розподільних мереж напругою 0,38–20 кВ з повітряними лініями електропередачі: СОУ-Н МПЕ 40.1.20.576:2005. Київ : ГРІФРЕ, 2005. 67 с.

18. Красножон А.В., Буйний Р.О., Пентегов І.В. Розрахунок втрат активної потужності в заземлювальному проводі повітряних ліній електропередачі. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4(2016). С. 23–25. <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.023>

19. Трансформатори силові. Типова інструкція з експлуатації: СОУ 40.1-21677681-07:2009. Міненерго України, 2009. 111 с.

20. Pignati M., Zanni L., Romano P., Cherkaoui R., Paolone M. Fault detection and faulted line identification in active distribution networks using synchrophasors-based real-time state estimation. *IEEE Trans. Power Del.* 2017. 32(1). 381–392.

21. Ren J., Venkata S., Sortomme E. An accurate synchrophasor based fault location method for emerging distribution systems. *IEEE Trans. Power Del.* 2014. 29(1). 297–298.

22. Halko S., Halko K. Research of electrical and physical characteristics of the solar panel on the basis of cogeneration photoelectric modules. *Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial: Colección de documentos científicos «ΛΟΓΟΣ» con actas de la Conferencia Internacional*

Científica y Práctica, 24 de abril de 2020. Barcelona, España: Plataforma Europea de la Ciencia. 2020. 2. 39–44. <https://doi.org/10.36074/24.04.2020.v2.10>

23. Галько С.В. Експериментальне дослідження і визначення параметрів когенераційного фотоелектричного модуля для гібридних сонячних електростанцій. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень* : матеріали Міжнар. наук. конф., 10 квітня 2020 р. Луцьк : МЦНД. 2020. Т. 1. 83–90. <https://doi.org/10.36074/10.04.2020.v1.10>

24. Галько С.В. Використання когенераційних фотоелектричних модулів для зарядки акумуляторів електромобілів. *Праці ТДАТУ. Технічні науки*. 2019. Вип. 19. Т. 3. 130–141. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-3-130-141>

25. Alrefo I.F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. 4. 82–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>

26. Savchenko O., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Sereda A., Dudnikov S., Kozlovskyi O., Buinyi R., Halko S. Improving the Efficiency of Solar Power Plants Based on Forecasting the Intensity of Solar Radiation Using Artificial Neural Networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 137–140, <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009>

27. Перевірочний розрахунок силового трансформатора : методичні вказівки до виконання розрахункових робіт з дисц. «Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання систем електропостачання» для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочн. форм навч., спец.: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / упоряд.: В.Г. Пазій, І.М. Трунова. Харків : ДБТУ, 2022. 35 с.

28. Viacheslav B., Roman B., Andrij S., Volodymyr T. Integration of New Single-Phase-to-Ground Faults Detection Devices into Existing SmartGrid Systems. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine. 2019. 84–87. <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764237>

29. Розводюк М.П., Проценко Д.П., Бомбик В.С., Жуков О.А. Розрахунок і проектування трифазного силового масляного трансформатора. Курсове проектування : електронний навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2023. 149 с.

30. Четверіков Ю.А. Якісний розрахунок обмоток силового трансформатора як основа забезпечення якості ремонту. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: наукові пошуки молоді»*. Харків : ДБТУ, 2024 р. 44. URL: <https://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi> (дата звернення: 19.02.2025).

31. Krasnozhan A.V., Buinyi R.O., Pentegov I.V. Calculation of active power losses in the grounding wire of overhead power lines. *Technical Electrodynamics*. 2016. 4. 23–25. <https://doi.org/10.15407/technd2016.04.023>

32. Четверіков Ю.А., Трунова І.М. Дослідження математичної моделі оптимізації технічних характеристик трансформаторів напруги. *Матеріали XX Міжнародного форуму молоді «Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті»*. 2024. URL: <https://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi> (дата звернення: 19.02.2025).

33. Норми часу на ремонт основного і допоміжного енергетичного обладнання. Частина 06. Ремонт трансформаторів і реакторів. Методичні рекомендації. СОУ-Н МЕН 40.1-00130044-602/90:2014. ДП «Львівське конструкторське бюро». 2014. 184 с.

34. Норми часу на ремонт і технічне обслуговування електричних мереж. Том 1. Повітряні лінії електропередач напругою 0,4-20 кВ, трансформаторні підстанції напругою 6-20/0,4 кВ, розподільні пункти напругою 6-20 кВ СОУ 40.1-00130044-834:2010. Київ : Мінпаливенерго України, 2010. 221 с.

35. Норми часу на ремонт і технічне обслуговування електричних мереж. Роботи служби ізоляції. Том 8: СОУ-Н ЕЕ 05.837:2006. ДП «Львівське конструкторське бюро», 2006. 122 с.

36. Офіційний сайт ТОВ ВП «Акватон». URL: <https://akvaton.com/uk> (дата звернення: 19.02.2025).

37. Dwornicka R., Pietraszek J. The outline of the expert system for the design of experiment. *Production Engineering*. 2018. 20. 43–48. <https://doi.org/10.30657/pea.2018.20.09>

38. Kennedy O., Elizabeth A., Robert O., John S. Monitoring And Fault Detection System For Power Transmission Using GSM Technology. *World Congress in Computer Science Computer Engineering & Applied Computing*, July 2017. 93–97.

39. Krynke M., Klimecka-Tatar D. The use of Computer Simulation Techniques in Production Management. *Materials Research Proceedings*. 2022. 24. 126–133. <https://doi.org/10.21741/9781644902059-19>

Стаття надійшла до редакції 23.02.2025



I. Trunova¹, A. Sereda¹, O. Savchenko¹, S. Popadchenko¹, S. Halko²

¹*State Biotechnological University*

²*Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

TECHNO-ECONOMIC MODEL OF POWER TRANSFORMER OVERHAUL WITH REPLACEMENT OF WINDINGS

Summary

The techno-economic model of power transformer overhaul with replacement of windings based on multi-objective optimization has been developed. This model is defined groups of target functions. The first group of target functions is by sizes criteria (finding the optimal structural wire size to ensure that the winding is placed in the magnetic pipeline window without breaking the requirements for insulating distances, and ensuring deviations of technical indicators of transformer that do not exceed the maximum permissible values). The second group of targeted functions is by technical criteria (the choice of variations of calculations with minimal no-load losses and short circuit losses). The third group - according to economic criteria, in particular, is using the payback period of investments, which allows choosing the most economical design option of the power transformer winding or the feasibility of replacing the damaged transformer with a new one. An example of testing the proposed techno-economic model of power transformer overhaul with replacement of windings using computer technologies at the stage of choosing a structural wire size for high voltage winding under conditions of restrictions on the maximum permissible insulating percussions in the window of the magnetic pipeline and the maximum permissible deviations of short-circuit losses is given. An example of determining the components for economic substantiation of power transformer overhaul with the replacement of windings using current regulatory documents is also given. It is concluded that the proposed techno-economic model of power transformer overhaul with replacement of windings on the basis of multi-objective optimization can be useful for substantiating the feasibility and ensuring the quality repair of damaged windings with proper magnetic pipeline for further efficient operation of the repaired equipment.

Keywords: multi-objective optimization, techno-economic indicators, transformer winding, computer technologies.



КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-12>

УДК 514.18

О. О. Вершков¹, канд. техн. наук

ORCID: 0009-0009-0616-8983

О. Є. Мацулевич¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5553-709X

М. В. Супрун¹, асистент

ORCID: 0009-0000-5903-1336

І. Р. Тетервак¹, асистент

ORCID: 0009-0009-0616-8983

¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*e-mail: oleksandr.vershkov.edu.ua**МОДЕЛЮВАННЯ КУЛАЧКІВ ЗУБОЗАТОЧУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ**

Анотація. У роботі вирішується завдання геометричного моделювання функціональних поверхонь кулачкових заточувальних пристроїв на основі таблично заданого закону переміщення штовхача з подальшою корекцією прямолінійних ділянок супроводжуючої ламаної лінії контуру кулачка, що задовольняє вимогам, які висуваються до роботи кулачкових механізмів із низькою швидкістю обертання.

Для цього авторами проаналізовано традиційну методику розрахунку профілю кулачка та виявлено її недоліки. На підставі аналізу цієї методики запропоновано універсальну методику проєктування робочих профілів кулачкових механізмів, а саме метод отримання координат профілю робочої поверхні кулачка на основі дискретного диференціювання табличної функції.

Для вирішення зазначеної проблеми запропоновано універсальний спосіб проєктування робочих профілів кулачків подачі та заточування для зубозаточувальних верстатів.

Доведено, що графіки аналогів швидкостей і прискорень переміщення штовхача, побудовані запропонованим способом, мають неосцилюючий характер, більш плавну зміну показників і відповідають графіку переміщень штовхача.

Згладжені значення швидкостей та прискорень переміщення штовхача розташовуються всередині смуги, що свідчить про відсутність осциляції. Запропонована методика дає змогу отримати значення швидкостей і прискорень переміщення штовхача в усіх заданих точках контуру кулачка. На основі отриманих значень швидкостей і прискорень отримано полярні координати точок профілю кулачків. Але розраховані точки мають полярні координати і розташовані на нерівномірній сітці кутів повороту кулачка. Це створює незручності під час подальшого використання програм для верстатів із числовим програмним забезпеченням. До того ж для забезпечення необхідної гладкості робочої поверхні кулачка визначеної кількості координат недостатньо. У зв'язку із цим авторами запропоновано схему згущення та проведено корекцію прямолінійних ділянок супровідної ламаної лінії.

Ключові слова: дискретно-представлена крива (ДПК), супроводжуюча ламана лінія (СЛЛ), кулачковий механізм, прямолінійна ділянка.

Постановка проблеми. У багатьох практичних застосуваннях, що вимагають циклічного повторення рухів робочого органу, широко використовуються механічні копіювальні пристрої. Одним із прикладів є заточування ріжучих елементів лісопильних машин. Кулачкові механізми ефективно справляються з подібними завданнями, оскільки вирізняються надійністю, простотою будови та зручністю в експлуатації. Проте користувачі стандартних заточувальних пристроїв часто мають труднощі з точним відтворенням геометрії зуба оригінального полотна після обробки. Ці проблеми зумовлені неточностями в обчисленні координат точок профілю

кулачка-копіра, що безпосередньо впливає на якість профільного заточування. Застосування полярної системи координат у процесі геометричного моделювання профілю кулачка може допомогти усунути ці недоліки.

Аналіз останніх досліджень. У працях [1; 2] розглядається спосіб моделювання кулачкових профілів газорозподільних систем двигунів внутрішнього згоряння з використанням полярних координат, де вихідною інформацією є табличне представлення руху штовхача. Створений таким чином профіль кулачка задовольняє вимоги, що ставляться до функціонування газорозподільних механізмів ДВЗ. Однак застосування цієї методики до геометричного моделювання кулачкових механізмів заточувальних пристроїв має певні обмеження. Ці недоліки зумовлені тим, що дискретні координати кулачкових профілів у швидкохідних двигунах задаються невеликою кількістю точок через високу швидкість обертання розподільних валів. Описуючи такий профіль у вигляді спіралеподібної замкненої ламаної лінії, отримуємо багатогранну поверхню з довгими прямолінійними відрізками, що визначають профіль. Для високошвидкісних кулачкових механізмів цей аспект несуттєво впливає на їхню ефективність. Проте кулачкові механізми заточувальних верстатів працюють на низьких обертових швидкостях, і для їхньої надійної та якісної роботи критично важлива відсутність значних за довжиною прямолінійних ділянок у профілі кулачка.

Формулювання мети статті. Метою статті є розроблення способу збільшення кількості точок на прямолінійних відрізках дискретно заданої кривої профілю кулачків, що використовуються в заточувальних пристроях, які функціонують за низьких швидкостей обертання кулачкового механізму.

Основна частина. На рис. 1 зображено будову двокулачкового верстата «Ритм РА-50 Харків», призначеного для заточування стрічкових пил 7. Кулачки подачі (1) та заточування (2) розташовані на спільному валу, який отримує обертання через регульований редуктор. Пари обкатних роликів (3) за допомогою системи важелів (4) трансформують обертальний рух профільованих кулачків у лінійний поздовжній рух штовхача (5) та поперечне переміщення абразивного круга (6). Синхронне переміщення пилки під впливом штовхача та робочої поверхні шліфувального круга забезпечує формування необхідної геометрії зуба в процесі заточування.

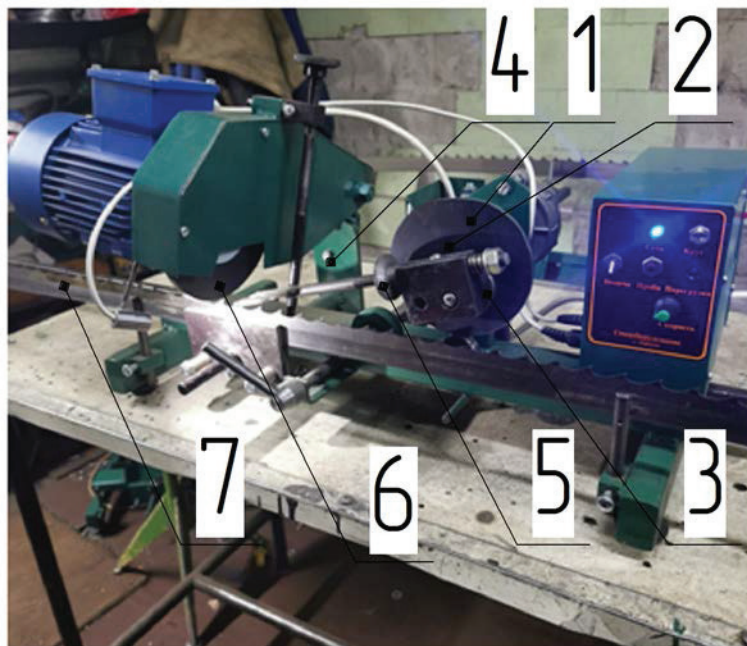


Рис. 1. Двокулачковий заточувальний верстат моделі «Ритм РА-50 Харків»

Розпишемо отримання значень радіусів на ділянці $(0;k)$:

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \rho_0 \frac{\sin(\alpha_1 + \phi_0)}{\sin(\alpha_1 + \phi_1)} = \rho_0 \frac{\sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_0)}{\sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_1)} \\ \rho_2 &= \rho_0 \frac{\sin(\bar{\alpha} + (m-1)\Delta + \phi_1) \sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_0)}{\sin(\bar{\alpha} + (m-1)\Delta + \phi_2) \sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_1)} \\ \rho_3 &= \rho_0 \frac{\sin(\bar{\alpha} + (m-2)\Delta + \phi_2) \sin(\bar{\alpha} + (m-1)\Delta + \phi_1) \sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_0)}{\sin(\bar{\alpha} + (m-2)\Delta + \phi_3) \sin(\bar{\alpha} + (m-1)\Delta + \phi_2) \sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_1)}\end{aligned}$$

Або в загальному вигляді:

$$\begin{aligned}\rho_k &= \rho_0 \cdot \frac{\sin(\bar{\alpha} + (m-k-1)\Delta + \phi_{k-1})}{\sin(\bar{\alpha} + (m-k-1)\Delta + \phi_k)} \cdot \frac{\sin(\bar{\alpha} + (m-k-2)\Delta + \phi_{k-2})}{\sin(\bar{\alpha} + (m-k-2)\Delta + \phi_{k-1})} \times \\ &\times \frac{\dots \sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_0)}{\dots \sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_1)};\end{aligned}\quad (2)$$

де k – кількість точок, вибраних на прямолінійній ділянці, $\bar{\alpha}$ – кут нахилу прямолінійної ділянки до полярної осі.

Варто зауважити, що величина m у виразі (2) не має бути значною. Вона вказує на те, який саме відрізок нової СЛЛ є паралельним відрізку $0-k$. Зокрема, якщо $m=2$ $\alpha_3 = \bar{\alpha}$, тобто ланка $(\bar{2}-\bar{3})/0-k$. Для досягнення приблизної симетрії створюваної ДПК відносно середини сегмента $0-k$ рекомендується вибирати значення $m=(k-1)/2$ або $m=(k+1)/2$ (рис. 3). Коли прямолінійна ділянка ДПК складається з непарної кількості ланок, центральний елемент відко-ригованої ділянки має бути орієнтований паралельно початковій прямій. У ситуації ж коли число ланок прямолінійної ділянки є парним, то як паралельну прямолінійній ланці можна вибрати ланку, розташовану праворуч або ліворуч від центрального вузла залежно від специфіки моделювання. При цьому ліворуч від вибраної ланки кути α_i зменшуються, а праворуч – збільшуються.

Висновки. Запропонована методика геометричного моделювання профілів кулачкових механізмів, що використовуються в заточувальних пристроях, а також розроблений спосіб збільшення кількості точок на прямолінійних ділянках апроксимуючої ламаної лінії профілю кулачка, відповідають вимогам, що висуваються до роботи низькошвидкісних кулачкових механізмів.

Список використаних джерел

1. Мацулевич О.Є. Апроксимація дискретно представлених кривих у полярній системі координат за критерієм найменших граничних відхилень : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мелітополь, 2003. 21 с.
2. Мацулевич О.Є., Найдіш А.В. Моделювання спіралеподібних ДПК у полярній системі координат на основі кутів нахилу ланок СЛЛ. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2002. Вип. 4. Т. 16. С. 31–35.
3. Alrefo I.F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun, O., Miroshnyk, O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2023. 4, 82–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>
4. Y. Havrylenko, J.I. Cortez, Y. Kholodniak, G.T.Garcia. Modelling of surfaces of engineering products on the basis of array of points *Tekhniki vjesnik* 27, 6(2020), 2034–2043. <https://doi.org/10.17559/TV-20190720081227>
5. Havrylenko Y., Kholodniak Y. Formation of geometric model of the impeller of the turbocharger. *Proceedings of the Tavria State Agrrotechnological University*, 2014. 14, 48–53.
6. Havrylenko Y., Kholodniak Y., Halko S., Vershkov O., Miroshnyk O., Suprun O., Dereza O., Shshur T., Śrutek. M. Representation of a monotone curve by a contour with regular change in curvature. *Entropy*, 2021. 23(7), 923, 1–14. <https://doi.org/10.3390/e23070923>



7. Havrylenko Y., Kholodniak Y., Halko S., Vershkov O., Bondarenko L., Suprun, O., Miroshnyk, O., Shshur, T., Šrutek, M., & Gackowska M. (2021). Interpolation with specified error of a point series belonging to a monotone curve. *Entropy*, 23(5), 493, 1–13. <https://doi.org/10.3390/e23050493>
8. Холодняк Ю.В., Гавриленко Є.А. Розв'язання позиційних задач при моделюванні монотонних кривих ліній. *Сучасні проблеми моделювання*. 2022. Вип. 24. С. 173–181.
9. Михайленко О.Ю., Антонова Г.В. Технологія формоутворення елементів каркасу динамічної поверхні. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12.Т. 2. № 26.
10. Холодняк Ю.В., Гавриленко Є.А. Моделирование каркаса динамических поверхностей. *Інноваційні технології в агропромисловому комплексі : матеріали II всеукраїн. наук.-практ. Інтернет-конференції*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 21–24.
11. Холодняк Ю.В., Гавриленко Є.А. Моделювання кривих ліній із заданою точністю. *Інноваційні технології в агропромисловому комплексі : матеріали II всеукраїн. наук.-практ. Інтернет-конференції*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 28–31.
12. Мацулевич О.Є., Щербина В.М. Використання пакету прикладних програм NETCRACKER. *Фундаментальна підготовка фахівців у природничо-математичній, технічній, агротехнологічній та економічній галузях : матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конференції з міжнар. участю, м. Мелітополь, присвяченої 85-річчю кафедри вищої математики і фізики ТДАТУ*, 11–13 вересня 2017 р. Мелітополь, 2017. С. 107–108.

Стаття надійшла до редакції 16.04.2025

O. Vershkov¹, O. Matsulevych¹, M. Suprun¹, I. Tetervak¹

¹ *Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

MODELING THE CAMS OF THE DENTACING MACHINES

Summary

The work solves the problem of geometric modeling of the functional surfaces of the cam sharpening devices on the basis of a tabular law of moving the pusher, followed by correction of the rectilinear sections of the accompanying broken line of the circuit of the cam, which satisfies the requirements that are put forward to the operation of the cam.

For this purpose the authors analyzed the traditional method of calculating the profile of the cam and revealed its disadvantages. Based on the analysis of this methodology, a universal technique of designing working profiles of cam mechanisms is proposed, namely the method of obtaining coordinates of the work surface of the cam on the basis of discrete differentiation of table function.

To solve this problem, a universal way of designing working profiles of fists and sharpening for dentacing machines is proposed.

It is proved that graphs of analogues of speed and acceleration of the movement of the pusher, constructed in the proposed way have a non-social character, more smooth change of indicators and correspond to the schedule of the displacement of the pusher.

Smoothed values of speed and acceleration of moving the pusher are located inside the strip, which indicates the absence of oscillation. The proposed technique allows you to obtain the value of speed and acceleration of moving the pusher at all specified points of the outline of the cam. On the basis of the obtained values of speeds and accelerations, the polar coordinates of the points of the profile of the cam were obtained. But the calculated points have polar coordinates and are located on an uneven grid of the angles of rotation of the cam. This creates inconvenience when using programs for numerical software. In addition, to ensure the required smoothness of the work surface of the cam, a certain number of coordinates is not enough. In this regard, the authors proposed a thickening scheme and corrected straight lines of the accompanying broken line.

Keywords: discrete-representative curve (DRK), accompanying broken line (ABL), CAM mechanism, straight line.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-13>

УДК 514.18

Є. А. Гавриленко¹, докт. техн. наукО. Є. Мацулевич¹, канд. техн. наукА. П. Чаплінський¹, ст. викладачІ. Р. Тетервак¹, асистентМ. В. Супрун¹, асистент

ORCID: 0000-0003-4501-445X

ORCID: 0000-0001-5553-709X

ORCID: 0000-0001-9213-5452

ORCID: 0009-0009-0616-8983

ORCID: 0009-0000-5903-1336

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: yevhen.havrylenko@tsatu.edu.ua

ТЕХНІЧНА ПІДГОТОВКА ВИРОБНИЦТВА ДЕТАЛІ «КОРПУС РОЗПОДІЛЮВАЧА»

Анотація. Рівень технічної підготовки виробництва залежить від багатьох чинників (технічних, економічних та організаційних). Технічні чинники включають розроблення й впровадження стандартних та нестандартних технологічних процесів, використання стандартизованого та єдиного технологічного обладнання. Економічні чинники включають поетапне фінансування на відкритому повітрі роботи з технічної підготовки виробництва, надання пільгових позик, створення фонду для стимулювання розвитку (виробництва для виробництва) нових продуктів. Організаційні чинники включають розроблення та поглиблення спеціалізації виробництва, сертифікацію якості технологічних процесів та засобів технологічного обладнання, нерівномірне обладнання на основі результатів оцінки якості прототипу або першої промислової партії продукції основного виробництва та вдосконалення організації допоміжного виробництва.

Підготовка до впровадження нового обладнання, виробу, новітніх технологічних процесів або модернізація застарілих виробів та існуючих технологій ініціюється в науково-дослідних інститутах і проєктно-конструкторських організаціях галузі. Подальша реалізація робіт здійснюється на підприємствах чи об'єднаннях за безпосередньої участі заводських структур управління науково-технічним розвитком. Технічна підготовка виробництва включає фази наукового дослідження нових моделей або верифікації його результатів щодо розроблення чи вдосконалення технологічних процесів у лабораторних умовах. Надалі вся ця документація передається безпосередньо на підприємство, де розпочинається технічна підготовка виробництва. Вона охоплює організацію робіт з освоєння нових виробів, поліпшення існуючих конструкцій, а також з впровадження нових і оптимізації діючих технологічних процесів.

У роботі відображено етапи створення конструкторської та технологічної документації. Авторами проведена якісна оцінка технологічності конструкції деталі, яка виконувалася за показниками: матеріал деталі, жорсткість деталі, конфігурація деталі, співвідношення кількості оброблюваних та необроблюваних поверхонь, відповідність шорсткості й точності поверхонь деталі, та зроблено висновок.

Ключові слова: конструкторська документація, технологічна документація, програмне забезпечення, технічне завдання, технологічний процес, система Unigraphics, керуючий модуль.

Постановка проблеми. Технічна підготовка виробництва деталей на підприємстві являє собою комплекс взаємопов'язаних науково-дослідних, проєктно-конструкторських, технологічних, організаційно-економічних та інших заходів, спрямованих на створення та впровадження у виробничий процес нових видів продукції, технологічних операцій, а також на вдосконалення вже освоєних конструкцій і технологій. Ключовими завданнями технічної підготовки виробництва є забезпечення безперервного здійснення науково-технічних розробок на підприємстві, що сприяють збільшенню обсягів виробництва та зменшенню собівартості продукції; зменшення тривалості виробничого циклу, зменшення трудомісткості та собівартості

продукції; формування необхідних передумов для стабільного та рентабельного функціонування підприємства.

Аналіз попередніх досліджень. Сучасні виробничі процеси на промислових підприємствах відзначаються неупинним зростанням складності, що є наслідком інтенсивного науково-технічного розвитку та його впровадження у виробничу сферу. Результатом цієї інтеграції є інноваційні технології, технологічні процеси у цілому та продуктивні нововведення зокрема [1; 2]. Однак імплементація інновацій у виробництво часто стикається з проблемою недостатньої адаптованості виробничих потужностей, що спричиняє значні організаційні та, як наслідок, фінансові втрати. У таких умовах особливої актуальності набуває питання результативності технічної підготовки виробництва до імплементації інновацій. Значущість даної проблеми підтверджується тим фактом, що в машинобудівній сфері етап технічної підготовки виробництва охоплює майже 70% загальної тривалості циклу освоєння нових виробів [4]. Технічну підготовку виробництва нових виробів слід розглядати як складний комплекс дослідницьких, проектно-конструкторських, технологічних та організаційних заходів, що є необхідними для гарантування ефективної адаптації підприємства з метою випуску нової продукції з оптимальним урахуванням часових, просторових та економічних чинників.

Основна частина. Першим етапом розроблення нової продукції є проектне (технічне) завдання, яке розробляється замовником (підприємством) самостійно або за його вказівкою проектною організацією [3]. У проектному завданні зазначаються назва продукції, її функціональне призначення, сфера застосування, технічні та економічні параметри в процесі виготовлення та експлуатації. На етапі проектного завдання необхідно визначити ключові відмінності нової конструкції або виробу від попередньо випущених, навести перелік та обґрунтування потреби в оригінальних компонентах, а також надати деталізовані розрахунки економічної доцільності нового виробу з урахуванням вигоди як для споживача, так і для виробника.

Виходячи з аналізу проектного завдання замовника та зіставлення різних можливих технічних варіантів, а також оцінки рішень з огляду на конструктивні та експлуатаційні характеристики розроблюваного та наявних виробів, у тому числі патентних матеріалів, розробляється технічна пропозиція. Вона являє собою комплекс конструкторських документів, що містять техніко-економічне обґрунтування подальшого розвитку проекту.

Технічна пропозиція після її узгодження та затвердження у встановленому порядку слугує основою для розроблення ескізного (технічного) проекту [3].

Ескізний проект являє собою комплект конструкторських документів, що неодмінно включає у себе основні конструктивні рішення, які формують загальне розуміння будови та принципу функціонування виробу. Окрім того, він містить відомості про призначення виробу, його ключові параметри та габаритні розміри. На стадії розроблення ескізного проекту визначається найбільш ефективна концептуальна модель нового виробу, охоплюючи його технічні, технологічні та експлуатаційні характеристики. Зазвичай ескізний проект розробляється у кількох можливих варіантах для подальшого вибору найкращого з них. Після його узгодження та затвердження ескізний проект слугує основою для створення технічного проекту або робочої конструкторської документації.

Технічний проект є комплектом конструкторських документів, який обов'язково містить остаточні технічні рішення, що забезпечують усебічне розуміння конструкції розроблюваного виробу, а також первинні дані, необхідні для підготовки робочої документації [3].

Технічний проект надає можливість здійснювати вибір потрібних матеріалів та напівфабрикатів, визначати головні способи виробництва продукції та проводити економічний аналіз проекту.



Після погодження та затвердження технічний проєкт є вихідною точкою для розроблення робочої конструкторської документації.

Завершальною фазою (етапом) конструкторської підготовки виробництва є розроблення технічної документації (креслеників, інструкцій тощо), а також технічних умов.

Етап конструкторської підготовки виробництва реалізується із застосуванням системи автоматизованого проєктування Unigraphics – інтерактивної системи автоматизації проєктування та виробництва. Для позначення систем даного типу застосовується аббревіатура CAD/CAM (Computer-Aided Design та Computer-Aided Manufacturing), що в дослівному перекладі означає «Автоматизоване проєктування» та «Автоматизоване виробництво». Підсистема CAD розроблена для автоматизації проєктних, конструкторських і креслярських операцій на сучасних виробничих підприємствах. Підсистема CAM забезпечує автоматизовану генерацію керуючих програм для обладнання з числовим програмним керуванням (ЧПК), використовуючи математичну модель деталі, розроблену в підсистемі CAD [1].

Unigraphics є системою з модульною організацією, де кожен модуль відповідає за виконання конкретних функцій. Доступ до всіх функціональних модулів Unigraphics здійснюється через головний керуючий модуль, що має назву Unigraphics Gateway. Наявність модуля Gateway є обов'язковою для кожного користувача Unigraphics, тоді як інші модулі є опціональними та можуть бути вибрані відповідно до індивідуальних потреб користувача.

Після завершення проєктування модуль Manufacturing дасть змогу вказати геометрію деталі, задати технологічні параметри (наприклад, діаметр інструмента) й автоматично сформувати траєкторію руху інструменту у вигляді файлу CLSF (Cutter Location Source File), що дослівно перекладається як «Вихідний файл положення інструменту». Пізніше цей файл буде використовуватися як вихідні дані для розрахунку керуючих програм.

Першим етапом конструкторської підготовки є створення кресленика деталі «Корпус розподільвача» за допомогою модуля Drafting (Кресленик) [4].

Модуль Drafting дає змогу отримувати кресленик або на основі тривимірної моделі, створеної модулем Modeling, або на основі двовимірних компонувань видів, створених за допомогою вбудованих засобів ескізного проєктування. Drafting підтримує автоматичне створення креслярських компонувань (включаючи ортогональні видові проєкції), перерізів, додаткових і місцевих видів, ізометричний кресленик. Окрім того, він забезпечує видо-залежне редагування (тільки в одному виді) й автоматичне видалення прихованих ліній.

У модулі Drafting креслення деталі представлено у трьох видах (рис. 1): головному, зліва й зверху. Також була додана ізометрична проєкція деталі [1].

Модуль Solids Modeling (Твердотільне моделювання) є основним інструментом параметричного моделювання, що забезпечує можливості створення двовимірних і тривимірних каркасних моделей, кінематичних тіл та тіл обертання, а також виконання булевих операцій і застосування функцій параметричного редагування. Важливо зазначити, що модуль Solids Modeling є необхідною умовою для функціонування модулів Features Modeling і Free Form Modeling.

Модуль Features Modeling (Моделювання базових елементів) призначений для створення та параметричного редагування типових конструктивних елементів, таких як отвори, пази, бобишки, кишені та виступи. Він дає змогу робити порожнини в тілах і створювати тонкостінні об'єкти (деталі з листового матеріалу). Конструктивний елемент може бути прив'язаний до інших базових елементів або об'єктів. Можна створити масив конструктивних елементів і встановити асоціативний зв'язок елементів масиву між собою і з іншими об'єктами. Для роботи цього модуля необхідний модуль Solids Modeling.

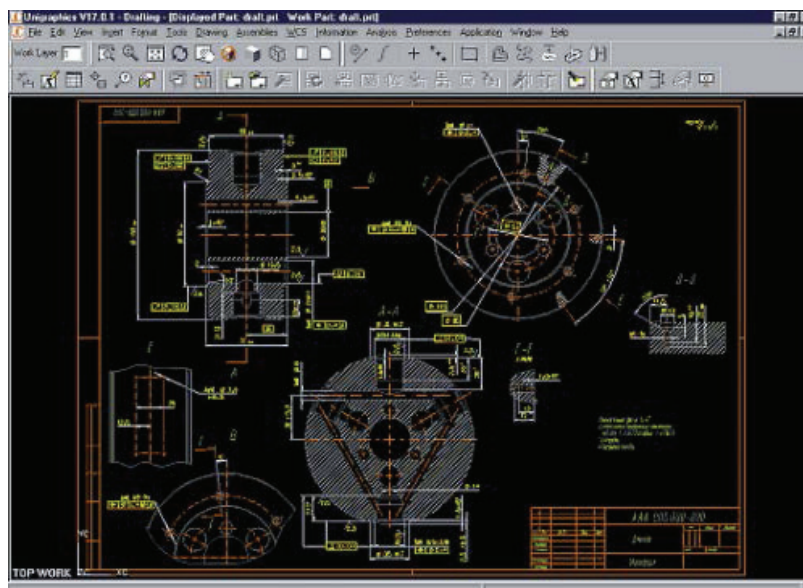


Рис. 1. Створення кресленика деталі корпусу розподілювача

Модуль Free Form Modeling (Моделювання вільних форм) забезпечує побудову складних поверхонь і моделей твердих тіл. Підтримуються такі типи поверхонь: кінематична поверхня (утворює лінію руху вздовж напрямної або вихідна форма пропорційно витягується уздовж однієї, двох або трьох напрямних), поліконічна поверхня (поверхня по конічних перетинах), поверхня на сітці точок, поверхня на сімействі ліній. Для роботи цього модуля необхідний модуль Solids Modeling.

Модуль User – Defined Features (Створення користувацьких базових елементів) надає засоби створення, зберігання, видалення та редагування типових конструктивних елементів користувача. Для позначення таких елементів будемо використовувати термін «користувальницький базовий елемент» або абревіатуру UDF (User – Defined Features), що дослівно перекладається як «Базовий елемент». Цей модуль дає змогу взяти існуючу параметричну модель тіла, побудовану стандартними засобами Unigraphics, установити взаємозв'язок між параметрами, зазначити вхідні змінні (формальні параметри), задати значення параметрів за замовчуванням і визначити, яку форму цей елемент набудатиме під час витягання. Сформований таким чином базовий елемент буде зберігатися в бібліотеці, до якої мають доступ усі користувачі, що працюють із модулем Features Modeling [1].

Створення деталі «Корпус розподілювача» можна прослідкувати на рис. 2, 3.

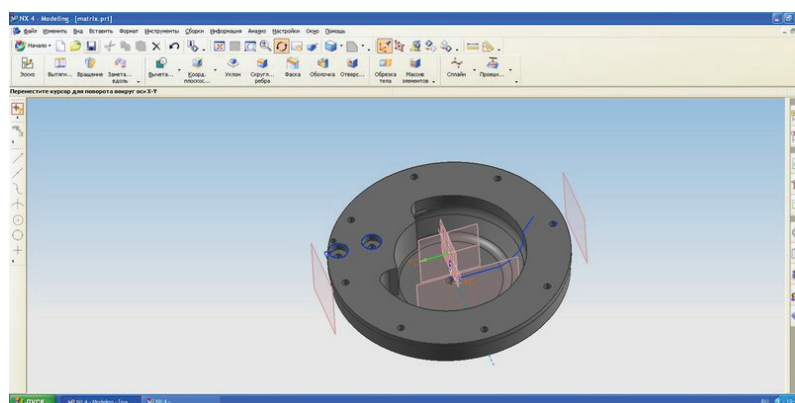


Рис. 2. Моделювання деталі в Unigraphics Modeling

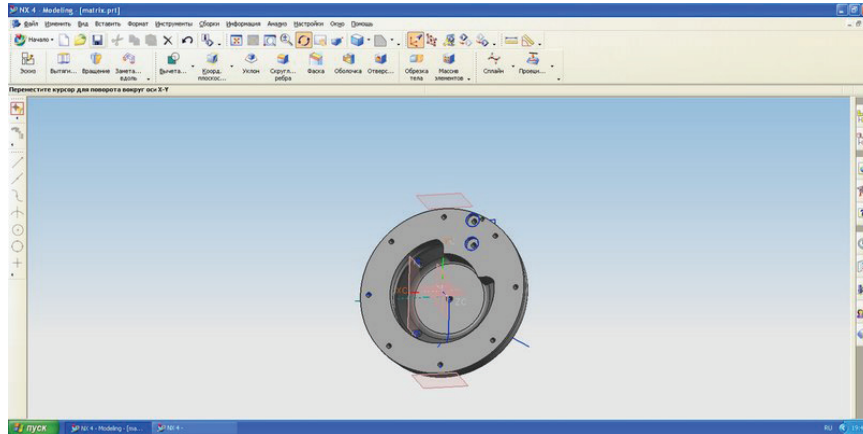


Рис. 3. Створення отворів

Одним із необхідних етапів проєктування деталі є розрахунок на міцність. Деталь «Корпус розподільювача» сприймає навантаження, а це може призвести до її деформації. Дія цього явища і буде досліджена за допомогою автоматизованої системи інженерних розрахунків COSMOSWorks.

COSMOSWorks являє собою потужний та інтуїтивно зрозумілий програмний комплекс, призначений для виконання інженерних розрахунків. Створений першочергово для потреб аерокосмічної галузі, COSMOSWorks надає можливість вирішувати широкий спектр інженерних задач різної складності. Будучи «золотим партнером» SolidWorks, COSMOSWorks легко інтегрується як додатковий модуль, забезпечуючи безперешкодний процес розрахунку. Завдяки інтегрованому рішенню SolidWorks та COSMOSWorks користувачі отримують ефективний та економічно вигідний інструмент для вирішення своїх інженерних завдань. Застосовуючи масштабований підхід, користувач може вибрати лише необхідний набір інструментів.

COSMOSWorks включає широкий спектр спеціалізованих розв'язувачів, що дають змогу проводити аналіз більшості типових задач для окремих деталей, вузлів та складальних одиниць, включаючи:

- проведення лінійного статичного аналізу;
- ідентифікацію власних форм та частот коливань;
- обчислення критичних навантажень та форм утрати стійкості;
- здійснення теплового аналізу;
- проведення сумісного термомеханічного аналізу;
- моделювання з'єднань із застосуванням контактних елементів;
- виконання нелінійних розрахунків;
- оптимізацію конструкції виробу;
- розв'язання електромагнітних задач;
- розрахунок електромагнітних задач;
- розрахунок течії рідин та газів;
- інтеграцію із системами CAD.

Аналіз збірок:

- автоматизоване створення сітки елементів з об'єднанням різних компонентів у єдину модель для розрахунку;
- аналіз збірок з урахуванням зазорів та сил тертя між деталями;
- моделювання поведінки збірок за значних нелінійних деформацій контактних поверхонь та наявності тертя;

- виявлення та аналіз інтерференції між компонентами збірки.

Для візуалізації результатів аналізу COSMOS/Works використовує тривимірну графіку на базі OpenGL [5]. Постпроцесор надає можливість перегляду таких розрахункових даних конструкції:

- напруження (еквівалентні, головні), відносні та абсолютні деформації, відображення деформованої геометрії, енергія пружної деформації, реакції опор;
- власні форми та відповідні частоти коливаль;
- температура, градієнти температури, теплові потоки;
- динамічне відображення перерізів моделі та побудова ізоповерхонь;
- майстер перевірки конструкції, що дає змогу визначати коефіцієнт безпеки;
- графічне представлення історії процесу оптимізації конструкції;
- графічне відображення зміни параметрів під час використання Р-методу скінченних елементів.

Для початку випробування створюємо проєкт (рис. 4) [5].

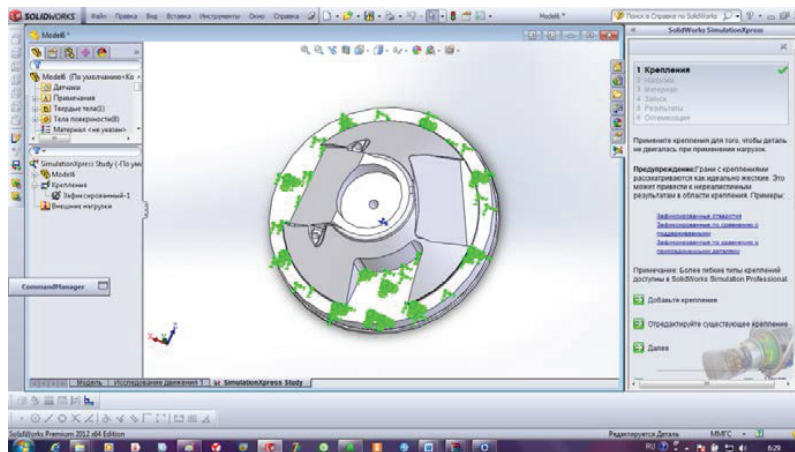


Рис. 4. Створення вправи в COSMOSWorks

Після створення статичної вправи необхідно даній моделі назначити матеріал, із якого вона буде виготовлятися (рис. 5). Вибираємо леговану сталь.

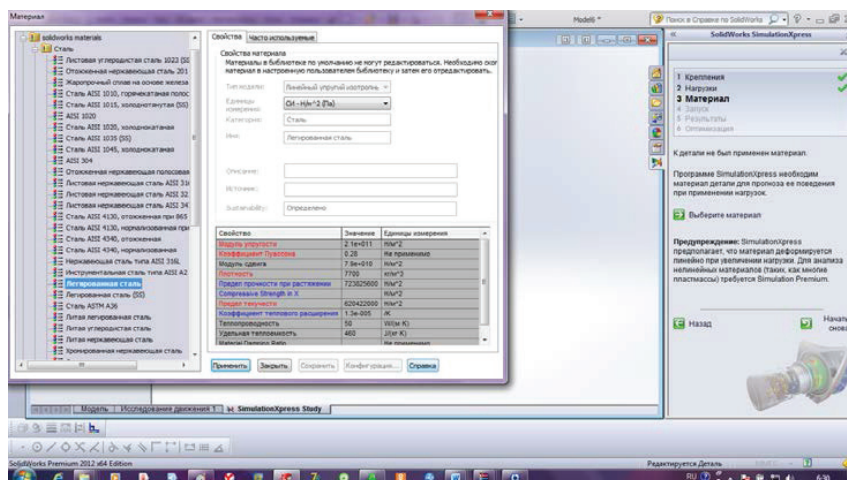


Рис. 5. Вибір матеріалу

Після вказання матеріалу необхідно вказати місця закріплення деталі та поверхні, на які буде створюватися тиск (рис. 6).

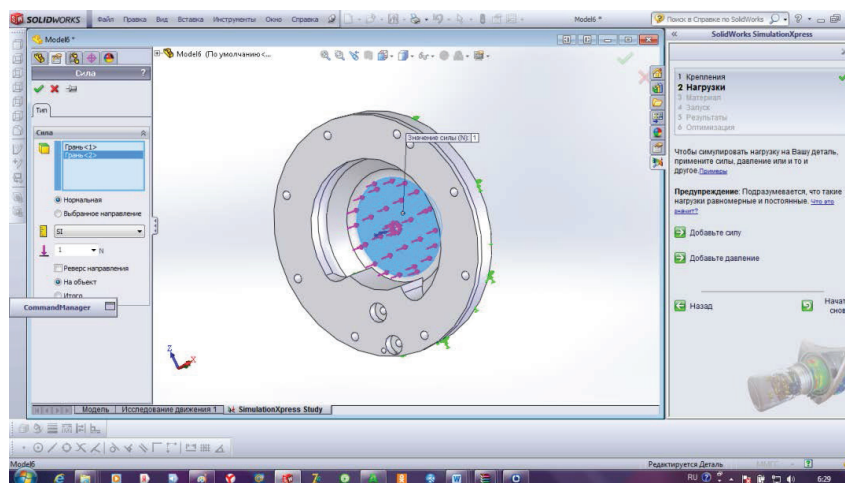


Рис. 6. Фіксація поверхонь і вказання напрямку діючих сил та їхніх величин

У результаті отримано такі показники (табл. 1).

Таблиця 1

Отримані показники

Ім'я властивості	Значення	Одиниці вимірювання	Тип значення
Модуль пружності	2.1e+011	N/m ²	Постійний
Коефіцієнт Пуассона	0.28	NA	Постійний
Модуль зсуву	7.9e+010	N/m ²	Постійний
Масова щільність	7800	kg/m ³	Постійний
Межа міцності під час розтягування	3.9983e+008	N/m ²	Постійний
Межа плинності	2.2059e+008	N/m ²	Постійний
Коефіцієнт теплового розширення	1.3e-005	/Kelvin	Постійний
Теплопровідність	43	W/(m.K)	Постійний
Питома теплоємність	440	J/(kg.K)	Постійний

Висновки. У роботі проведено якісну оцінку технологічності конструкції деталі, яка виконувалася за такими показниками, супроводжуючи висновком: «за цим показником деталь технологічна або частково технологічна, або нетехнологічна».

1. Матеріал деталі (технологічність обробки, вартість). Легована сталь характеризується високою оброблюваністю різанням із використанням різноманітного різального інструменту, а також сумісна з різними видами термічної обробки (загартування, відпал тощо). Ціна матеріалу становить 500 грн за кілограм. Деталь є технологічною у виробництві.

2. Жорсткість деталі. Деталь має хорошу жорсткість за всіх видів обробки. Деталь технологічна.

3. Конфігурація (раціональність, доступність обробки). Деталь простої форми, що полегшує установку і закріплення деталі за всіх видів обробки. Усі поверхні, оброблювані різанням, доступні і забезпечують легке підведення інструменту в зону обробки. Деталь технологічна.

4. Співвідношення кількості поверхонь, що обробляються різанням і не вимагають такої обробки. Усі поверхні деталі обробляються різанням. Деталь частково технологічна.



5. Обґрунтувати необхідність установлення допусків на відхилення від форми поверхонь та їх взаємного розташування. Зокрема, допуск паралельності становить 0,02 мм, необхідний для гарантування точності складання та забезпечення оптимального функціонування деталі у складі складальної одиниці. Деталь є технологічною у виробництві.

6. Відповідність шорсткості (сьомий клас) і точності поверхонь деталі. Шорсткість не відповідає квалітетам точності поверхонь. Деталь нетехнологічна.

Раціональність розмірних ланцюгів, можливість поєднання конструкторських, вимірювальних і технологічних баз. Розміри на кресленку розташовані раціонально. Конструкторська і технологічна бази деталі співпадають, що підвищує точність виготовлення деталі, а отже, і експлуатаційних показників. Деталь технологічна.

На основі здійсненої якісної та кількісної оцінки деталі щодо її технологічності можна констатувати, що деталь є частково технологічною.

Список використаних джерел

1. Мацулевич О.Є., Дереза О.О., Тетервак І.Р. Використання CAD-системи UNIGRAPHICS для технологічної підготовки виробництва корпусних деталей. *Удосконалення освітньо-виховного процесу в закладі вищої освіти* : збірник науково-методичних праць ТДАТУ. 2023. Вип. 26. С. 166–175.
2. Мацулевич О.Є. Застосування спеціалізованої PLM-системи TechnologiCS при розробці автоматизованої системи ведення конструкторсько-технологічних баз даних підприємства сільськогосподарського машинобудування. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. Вип. 24. Т. 1. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-1-13.
3. Програмування автоматизованих процесів обробки деталей : навчально-методичний посібник. Лабораторний практикум / Ю.О. Дмитрієв та ін. Мелітополь, 2022. 170 с.
4. Мацулевич О.Є., Щербина В.М., Залевський С.В. Автоматизація процесу геометричного моделювання робочих поверхонь насадок для фонтанів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 8. Т. 1. С. 55–68.
5. Мацулевич О.Є., Зінов'єва О.Г. Розв'язання задач аналізу тренд-сезонних часових рядів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 19(2). С. 264–270.

Стаття надійшла до редакції 24.04.2025

Y. Havrylenko¹, O. Matsulevych¹, A. Chaplinskyi¹, I. Tetervak¹, M. Suprun¹

¹ Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

TECHNICAL PREPARATION OF PRODUCTION PARTS «DISTRIBUTOR HOUSING»

Summary

The level of technical preparation of production depends on many factors (technical, economic and organizational). Technical factors include the development and implementation of standard and standard technological processes, the use of standardized and single technological equipment. Economic factors include gradual financing in the open air work on technical preparation of production, providing preferential loans, creating a fund for stimulating development (production for production) of new products. Organizational factors include the development and deepening of production specialization, certification of the quality of technological processes and means of technological equipment, uneven equipment based on the results of the quality assessment of the quality of prototype or the first industrial batch of products of basic production and improvement of the organization of auxiliary production.

Preparation for the introduction of new equipment, product, the latest technological processes or modernization of outdated products and existing technologies is initiated in research institutes and project organizations of the industry. Further implementation of works is carried out at enterprises or associations with the direct participation



of factory structures of management of scientific and technical development. Technical preparation of production includes phases of scientific research of new models or verification of its results in the development or improvement of technological processes in laboratory conditions. In the future, all this documentation is transferred directly to the enterprise, where the technical preparation of production begins at the enterprise itself. It covers the organization of works on the development of new products, improvement of existing structures, as well as the introduction of new and optimization of existing technological processes.

The work shows the stages of creation of design and technological documentation. The authors conducted a qualitative evaluation of the deviation of the comment, which was called out: material of the workpiece, the rigidity of the workpiece, the configuration of the workpiece, the ratio of the number of processed and unprocessed surfaces, the correspondence of the roughness and the statement.

Keywords: design documentation, technological documentation, software, technical task, technological process, Unigraphics system, module control.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-14>

УДК 515.2

О. О. Дереза¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-9358-7968

О. Є. Мацулевич¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5553-709X

Г. В. Антонова¹, ст. викладач

ORCID: 0000-0002-0357-6086

О. Ю. Михайленко¹, ст. викладач

ORCID: 0000-0002-8836-3222

¹ Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: olena.dereza@tsatu.edu.ua

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПРОФІЛЮВАННЯ ЧЕРВ'ЯЧНИХ ФРЕЗ БЕЗ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ

Анотація. У роботі дана характеристика функціональних поверхонь черв'ячних фрез. Зазначено, що найбільш продуктивним різальним інструментом є чистові черв'ячні фрези з просторовою ріжучою крайкою. Застосування в новій машинобудівній технології чистових черв'ячних фрез без інтерференції дає змогу уникнути підрізання, заклинювання, небезпечних концентрацій напруг і підвищує точність, продуктивність та надійність широкого класу деталей у машинобудуванні й різальному інструменті. Розроблення даного способу проєктування черв'ячних фрез здійснюється з урахуванням цієї умови. Застосування сучасного програмного забезпечення, що дає змогу розробляти, прораховувати й візуально відображати отримані сполучені поверхні, істотно скорочує строки проєктування і збільшує точність результатів. Розроблено оригінальний програмний продукт для отримання профілю черв'ячної фрези у нормальному перерізі, що дало змогу повністю автоматизувати процес проєктування. Розроблена і реалізована в роботі програмна методика проєктування і розрахунку черв'ячних фрез має більшу достовірність порівняно з традиційною. Виявлено, що під час проєктування багатозаходних черв'ячних фрез із кутом підйому понад 6° виходять погрішності, які значно перевищують допуски на виготовлення гвинтових нелінійчатих поверхонь. Для усунення цих недоліків у роботі застосовано кінематичний спосіб проєктування точних, високопродуктивних черв'ячних фрез із більшим кутом підйому витків. Підсумком роботи є створена автоматизована система проєктування функціональних поверхонь зубонарізного інструменту. Результати роботи пройшли апробацію і прийняті до впровадження у виробничому підрозділі відкритого акціонерного товариства «Запорізький автомобілебудівний завод».

Ключові слова: автоматизована система проєктування, черв'ячна фреза, профілювання, функціональна поверхня, зубонарізний інструмент, профіль зуба, нормальний переріз, попарно спряжені аксоїди, кінематичний гвинт.

Постановка проблеми. Для забезпечення якісного контакту елементів зубчастих передач, що є запорукою їх надійної експлуатації, необхідно, щоб розміри та профіль черв'ячної фрези відповідали геометрії зубчастого колеса в процесі виготовлення. Хоча новостворена черв'ячна фреза спочатку відповідає цим критеріям, її повторне загострення призводить до зменшення діаметра. Це, своєю чергою, спричиняє зменшення висоти зубів шестерні або зубчастого колеса, що унеможливорює належне зачеплення зубчастої передачі. Наявні у виробництві методи вирішення цієї проблеми здатні лише тимчасово продовжити термін служби інструменту. Упровадження в сучасні машинобудівні технології чистових черв'ячних фрез, які не викликають інтерференції, дає змогу запобігти підрізанню, заклинюванню, небезпечним концентраціям напружень та підвищити точність, продуктивність і надійність широкого спектра деталей та різального інструменту.

Розроблення черв'ячних фрез, що мають складну геометричну форму, вимагає значного обсягу обчислень, які є досить складними та часозатратними. З огляду на це, важливим є впро-

вадження автоматизації в усі етапи проєктування за допомогою сучасних систем автоматизованого проєктування (CAD).

Аналіз попередніх досліджень. У працях науковців Одеської школи прикладної геометрії під керівництвом доктора технічних наук, професора А.М. Подкоритова [1; 2] запропоновано спосіб проєктування прецизійних та високоефективних черв'ячних фрез, які унеможливають інтерференцію. Цей спосіб базується на кінематичному методі проєктування чистових черв'ячних фрез шляхом побудови обвідних сімейств кінематично спряжених аксоїдів, що відповідають діаграмі кінематичного гвинта.

Фундаментом цієї методики є теорема, сформульована професором Подкоритовим:

За умови, що кожену зі спряжених узагальнених поверхонь Σ_A і Σ_B розглядати як обвідну множини попарно спряжених миттєвих аксоїдів Φ_A^i і Φ_B^j , які відповідають діаграмі кінематичного гвинта, кожна точка дотику поверхонь Σ_A і Σ_B ідентифікується як точка дотику лінії контакту $m(\tau)$ аксоїдів з поверхнею Σ_A .

Згідно з теорією кінематичних гвинтів, через будь-яку точку контакту характеристики проходить спільна нормаль спряжених поверхонь, яка є віссю лінійного комплексу гвинта відносно руху поверхонь Σ_A і Σ_B (рис. 1).

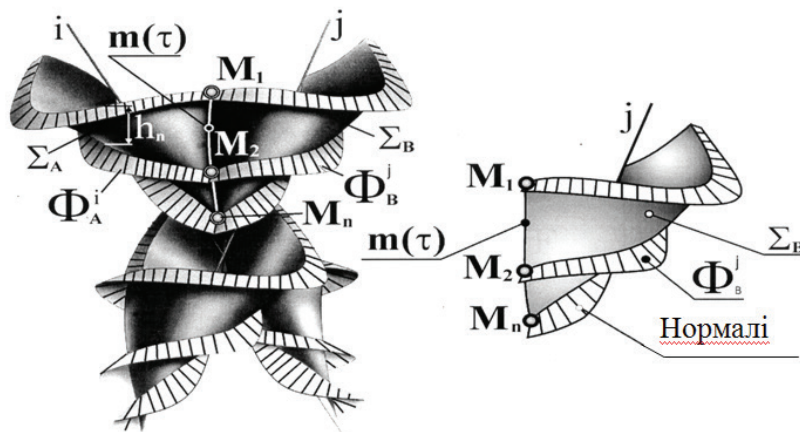


Рис. 1

Відповідно до теорії кінематичних гвинтів, через кожену точку контакту характеристики проходить спільна нормаль спряжених поверхонь, яка являє собою вісь лінійного комплексу гвинта відносно руху цих поверхонь. Суть кінематичного підходу до проєктування вихідної різальної поверхні Σ_A черв'ячної фрези, яка контактує із заданою криволінійною поверхнею Σ_B оброблюваної деталі, полягає у тому, що характеристика лінії контакту спряжених аксоїдів визначається як геометрична множина точок, що одночасно здійснюють два види рухів: обертальний – навколо осі I та поступальний – уздовж осі I [2].

Формулювання мети статті. Основною метою статті є створення автоматизованої системи для проєктування черв'ячних фрез зі складною геометричною формою із застосуванням сучасних систем автоматизованого проєктування (CAD).

Основна частина. Запропонований програмний модуль розроблено з метою розширення Autodesk Inventor стандартного функціоналу системи автоматизованого проєктування. Він є спеціалізованою підсистемою автоматизованого проєктування, орієнтованою на конкретне завдання, а саме – проєктування черв'ячних зубонарізних фрез.

У процесі проєктування передбачається вирішення таких завдань:

- обчислення геометричних параметрів фрези;

- визначення значень показників точності та технічних вимог відповідно до класу точності нарізаного колеса;
- створення тривимірної моделі фрези.

Програмний засіб для отримання профілю робочої поверхні зубонарізного інструменту було розроблено в середовищі програмування C++, яке повністю інтегроване з пакетом прикладних програм Autodesk Inventor.

Початковими даними для проектування черв'ячних фрез, призначених для обробки зубчастих коліс, слугують параметри оброблюваної шестерні або зубчастого колеса.

На початковому етапі моделювання відбувається отримання профілю зуба шестерні шляхом задання таких вихідних параметрів зубчастого колеса (рис. 2):

- модуль зачеплення;
- кут профілю базового контуру;
- коефіцієнт висоти головки зуба;
- коефіцієнт радіального зазору;
- кількість зубів;
- коефіцієнти зсуву базового контуру коліс;
- кут нахилу зубців;
- напрям лінії зубів.

Рис. 2

Отриманий профіль використовується для створення першої криволінійної поверхні Σ_A кінематичного гвинта (як показано на рис. 1).

Після введення параметрів зубчастого колеса подальшим етапом моделювання є введення в діалогове вікно програмного забезпечення параметрів фрези, таких як її тип, вид черв'яка, кількість заходів черв'яка та клас точності і т. д.

На сторінці «Параметри фрези» (рис. 3) вибираються тип фрези, клас точності, конструктивні параметри та задаються параметри стружкової канавки (рис. 4).

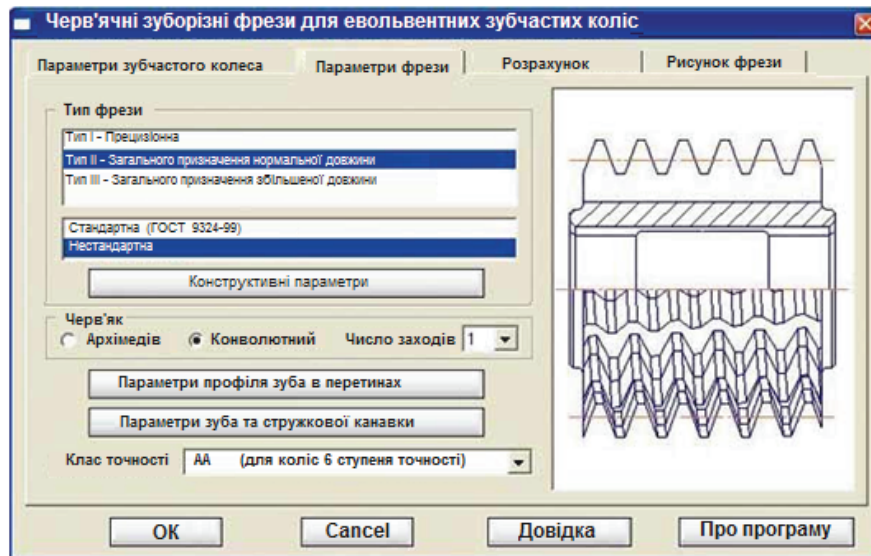


Рис. 3. Вікно вибору типу черв'ячної фрези та її основних параметрів



Рис. 4. Параметри бічного профілю зуба й стружкової канавки

Реалізовано розрахунок як нестандартних черв'ячних фрез, так і вибір із бази даних стандартних фрез відповідно до Держстандарту 932480Е. Переглянути параметри стандартних черв'ячних фрез можна, натиснувши кнопку «Конструктивні параметри».

Третя сторінка є вихідною. На ній можна переглянути результати розрахунку. Під час натискання на кнопку Ok спочатку відбувається перехід на третю сторінку, щоб користувач міг побачити приблизні результати розрахунку, а за повторного натискання на Ok з'являється фантом, або робочий кресленик фрези.

Наступна сторінка відображає отриманий профіль фрези (рис. 5). На ній можна візуально проконтролювати побудований профіль. Результати розрахунку також можна автоматично передати в Excel.

Із Excel програмний модуль взаємодіє за допомогою технології OLE Automation через IDispatch-інтерфейси за допомогою класів, похідних від класу COleDispatchDriver.

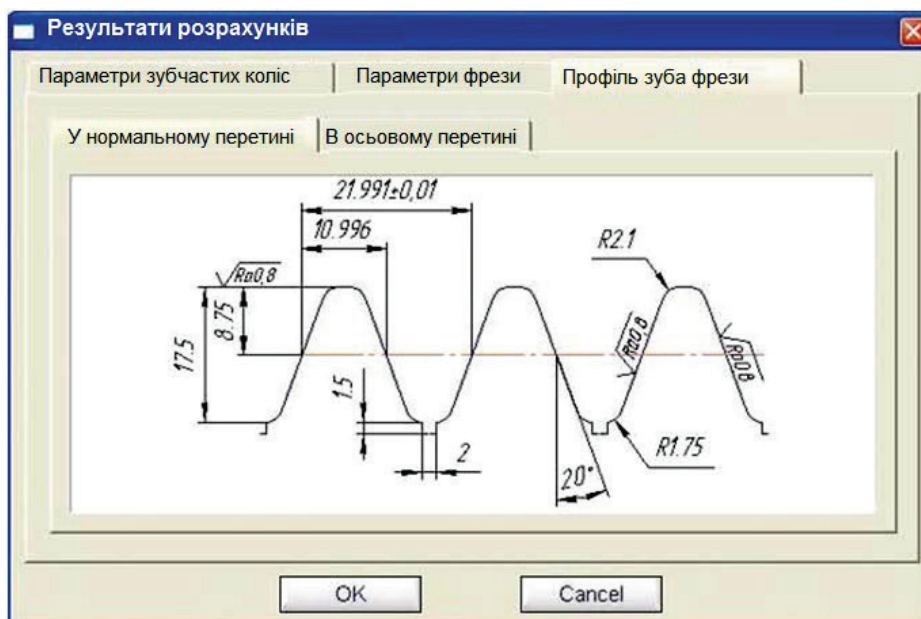


Рис. 5. Профіль зуба фрези

На четвертій сторінці (рис. 6) задається спосіб виводу результатів проектування. Можна задати оформлення креслення фрези з розмірами (робітник креслення), без розмірів (загальний вид, розріз, ліворуч, праворуч), побудова тривимірної моделі фрези, вивід результатів розрахунку геометрії.

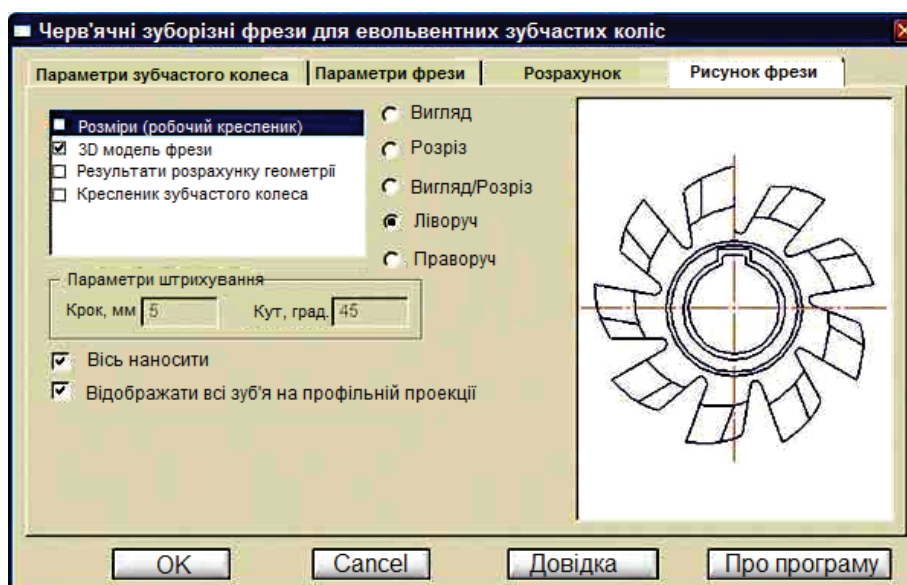


Рис. 6. Вибір способу візуалізації результатів проектування

Кінцевим результатом роботи програмного забезпечення є профіль зуба фрези, отриманий у нормальному перерізі, який потім передається до системи Autodesk Inventor для створення тривимірної моделі черв'ячної фрези з використанням розробленого додаткового програмного модуля (рис. 7).

За зміни будь-яких вихідних даних відбувається перерахування геометричних параметрів фрези й перемальовування її слайда.

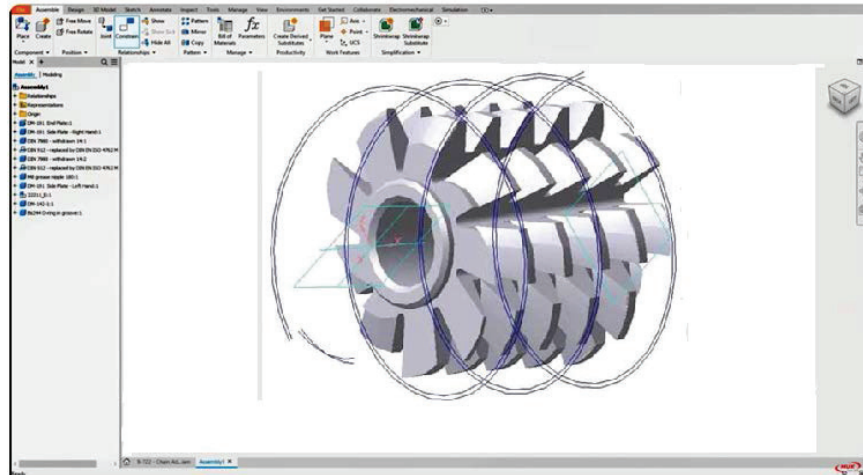


Рис. 7. Створення у системі Autodesk Inventor тривимірної моделі черв'ячної фрези

Якщо в параметрах відрисовки була включена опція 3D-модель фрези, то після створення робочого креслення формується деталь, що містить тривимірну модель інструмента.

Висновки. Після отримання тривимірної моделі черв'ячна фреза заноситься до бібліотеки ріжучого інструменту, яка може виступати в ролі СОМ-компонента для інших додатків. Ця перевага відрізняє бібліотеку від усіх прикладних бібліотек, що поставляються разом з Autodesk Inventor.

Список використаних джерел

1. Павлышко А.В. Комплексное геометрическое моделирование сопряженных нелинейчатых поверхностей без интерференции на базе современной компьютерной технологии : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 2003.
2. Гавриленко Є.А. Визначення положення центрів кривини дискретно представленої кривої *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. 2012. Вип. 5(76). С. 145–151.
3. Гавриленко Є.А. Визначення границь діапазонів положення центрів кривини плоского обводу. *Прикладна геометрія та інженерія. Графіка*. 2012. Вип. 4. Т. 52. С. 103–106.
4. Михайленко О.Ю., Антонова Г.В. Технологія формоутворення елементів каркасу динамічної поверхні. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12.Т. 2. № 26.
5. Мацулевич О.Є., Щербина В.М., Залевський С.В. Автоматизація процесу геометричного моделювання робочих поверхонь насадок для фонтанів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 8. Т. 1. С. 55–68.
6. Дереза О.А., Антонова Г.В., Тетервак І.А., Валієва К.М. Аналітичні дослідження методики інтелектуального аналізу даних. Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації : матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 29–31 травня 2023 р. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. С. 147–153.
7. Alrefo I.F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun, O., Miroshnyk, O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2023. 4, 82–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>
8. Y. Havrylenko, J.I. Cortez, Y. Kholodniak, & G.T. Garcia. (2020) Modelling of surfaces of engineering products on the basis of array of points *Tehnički vjesnik* 27, 6(2020), 2034–2043. <https://doi.org/10.17559/TV-20190720081227>
9. Havrylenko, Y. Kholodniak, Y. Formation of geometric model of the impeller of the turbocharger. *Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University*, 2014. 14, 48–53.
10. Alrefo I.F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O., Miroshnyk, O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2023, 4, pp. 82–88.. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>. ISSN 2071-2227, E-ISSN 2223-2362. (Q3).

Стаття надійшла до редакції 27.04.2025



O. Dereza¹, O. Matsulevych¹, G. Antonova¹, O. Mykhaenko¹

¹ Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

AUTOMATION OF THE PROFILING PROCESS OF WORM CUTTERS WITHOUT INTERFERENCE

Summary

The paper presents a characteristic of the functional surfaces of worm milling cutters. It is noted that the most productive cutting tool is finishing worm milling cutters with a spatial cutting edge. The use of finishing worm cutters in new machine-building technology, without interference, allows you to avoid undercutting, jamming, dangerous stress concentrations and increases the accuracy, productivity and reliability of a wide class of parts in mechanical engineering and cutting tools. The development of this method of designing worm cutters is carried out taking into account this condition.

The use of modern software that allows you to develop, calculate and visually display the resulting mating surfaces significantly reduces design time and increases the accuracy of the results

The work developed an original software product for obtaining the profile of a worm cutter in a normal cross-section, which allowed for the complete automation of the design process.

The software methodology for designing and calculating worm milling cutters developed and implemented in the work has greater reliability compared to the traditional one. It was found that when designing multi-start worm milling cutters with a lead angle of more than 6° , errors are obtained that significantly exceed the tolerances for manufacturing helical non-linear surfaces.

To eliminate these shortcomings in the work, a kinematic method of designing precise, high-performance worm cutters with a larger angle of rise of the turns was used. The presence of software allows you to effectively adjust the profile of the cutter tooth during manufacturing.

The result of the work is the creation of an automated system for designing functional surfaces of a gear-cutting tool. The results of the work have been tested and accepted for implementation in the production unit of the Zaporizhia Automobile Plant Open Joint Stock Company.

Keywords: automated design system, worm cutter, profiling, functional surface, gear cutting tool, tooth profile, normal cross-section, pairwise conjugate axoids, kinematic screw.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-15>

UDC 004.4'2

D. Lubko¹, Ph.D.

ORCID: 0000-0002-2506-4145

Yu. Sitsylitsyn², Ph.D.

ORCID: 0000-0002-3888-5575

¹ Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University² Bogdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University

e-mail: dmytro.lubko@tsatu.edu.ua

e-mail: Sicylicyn_Yurij@msspu.edu.ua

FEASIBILITY AND METHODS OF DESIGNING DIGITAL PLATFORMS FOR FARMING

Summary. Typically and often, farms in the country face several problems in selling their products (which they produce or grow), which significantly affects their business. Here are the main ones: seasonality of production; the need for a large number of intermediate links (in many cases, farmers' products go through several stages before reaching the final consumer (wholesalers, retailers, other intermediaries); imperfect marketing infrastructure (farmers often have limited access to markets, which is why they cannot sell their products effectively); low product prices; problems with product quality and safety (without proper standards and certifications, farmers may face problems selling their products in large markets); logistics and transportation (transporting products over long distances can cause significant product losses); market risks and uncertainty (agricultural markets are subject to significant fluctuations, which makes farmers vulnerable to changes in demand or prices for their products); youth and brain drain (the problem of insufficient numbers of young workers willing to work in agriculture).

All of these problems can significantly affect the efficiency of farms and create difficulties for their development.

Note: A farm is an enterprise that carries out agricultural activities based on the use of land and other natural resources for the production of agricultural products. It can vary in size and is usually focused on the production of products for its own consumption and/or sale.

Keywords: digital portal, design methods, farming, agriculture, digital portal/website.

Statement of the problem. Developing a portal/website for farms is an important step in improving customer interaction, optimizing business processes, and expanding sales markets.

Let's analyze the most relevant areas for developing a farm portal/website:

1. *Intuitive interface.* The digital portal should be easy to use, with a clear and convenient navigation menu that allows you to quickly find the information you need. It is important that even people with minimal Internet knowledge can use the digital portal without problems.

2. *Information about goods and services.* Creating pages for each type of product produced on the farm with detailed descriptions, prices, and photos will help potential customers understand exactly what they can buy and also browse the available options.

3. *Integration with online sales.* The ability to purchase products directly through a digital portal. This could be an online store or a pre-order platform. This requires convenient payment and delivery features.

4. *Mobile adaptation.* A digital portal should be optimized for mobile devices, as many users access portals/sites via smartphones and tablets. The mobile version should be fast and functional.

5. *Farm information.* An "About Us" page with the farm's history, values, and mission. This helps to build a connection with customers and show that the farm is a reliable partner.

6. *Blog and news.* Maintaining a blog or news section that publishes farm news, farming tips, seasonal articles, and recipes using your produce helps attract additional audiences and build authority in the industry.



7. *Feedback system.* A form for contacting the administration, phone numbers, chat for online consultations. It is important to quickly answer questions and provide necessary information to customers.

8. *Integration with social networks.* The ability to connect to social networks (Facebook, Instagram, TikTok, etc.) to promote products, publish news, photos and videos from the farm's work process. This allows you to attract new customers and maintain contact with regular ones.

9. *Delivery map and product availability.* Indication on the page of which regions are served, where to buy products (if not online sales), or where to pick up orders. This is convenient for customers looking for farm products in their area.

10. *Environmental and certification.* If the farm is certified according to organic or ecological production standards, it is important to indicate this on the portal. This creates additional trust in the products and gives customers confidence in their quality and safety.

These elements will help not only increase the effectiveness of the farm's digital portal, but also create a positive image and trust among potential customers.

That is why, based on the above, the relevance of this topic of work is determined, which in turn implies that to solve it, it is necessary to consider the feasibility and analyze the methods of designing digital platforms for farms.

Analysis of recent research. Recent research and practices in the field of designing digital platforms/websites for farms indicate the integration of modern technologies, focus on user needs, and implementation of digital solutions to improve the efficiency of the agricultural sector.

The main areas include:

1. *Integration of digital technologies into agriculture.* Digital farm platforms/websites increasingly incorporate elements of digital agriculture, which combine computer and electronic devices to improve production and management. This includes the use of automated management systems, modern software, and data analytics to optimize agricultural processes.

2. *Development of portals/web applications for the agricultural sector.* Research highlights the importance of creating portals/web applications that allow farmers to track energy consumption, analyze costs, and optimize resource use. Such applications contribute to increasing energy efficiency and climate resilience of farms.

3. *SEO optimization and promotion of portals/sites.* To ensure visibility and attract the target audience, it is important to conduct an SEO audit, analyze competitors, and develop strategies for promoting farm portals/sites. This includes collecting semantic core, keyword clustering, and improving the internal structure of the site.

4. *Using modern technologies in web development.* Using technologies such as WordPress, Laravel, and React.js allows you to create fast, user-friendly, and responsive farm portals/sites. This provides ease of content management and improves user interaction.

5. *Creation of a digital farm passport.* Using aerial photography data to create a detailed digital farm passport allows you to obtain statistical information about the territory, which contributes to better management and planning of agricultural processes.

Overall, recent studies highlight the trend towards integrating digital solutions into farm portals/websites, which contributes to increasing the efficiency, transparency, and competitiveness of the agricultural sector.

Here are some Ukrainian and foreign scientists who have dealt with the creation of portals/sites or digital platforms for farms:

A) Ukrainian scientists: Oleksandr Zaitsev (a specialist in the field of information technology, who is engaged in the development of digital platforms/sites for agricultural enterprises, in particular for agricultural management); Vitaliy Honcharenko (Ukrainian scientist in the field of computer

science, author of research on the use of Internet technologies to support farms and agricultural enterprises); Iryna Plahotniuk (a researcher who is engaged in the development of portals/sites for agribusiness, as well as the use of online platforms to increase the efficiency of agricultural activities); Yuriy Prokopenko (a scientist working on the integration of web development technologies to create platforms for agribusiness, which may include opportunities for selling products, online consultations).

B) Foreign scientists: David E. Goodwin (American scientist and information technology expert, developing digital platforms/websites for agricultural enterprises); Eric J. von Cramon-Taubadel (professor of agricultural sciences, researching the integration of digital technologies into agriculture, in particular the creation of websites and platforms for farm management); Michael C. O'Keeffe (scientist, developing digital technologies and websites for the agricultural sector, including tools for online sales of agricultural products and business management); Jeffrey D. Sachs (actively researching the role of digital platforms and Internet technologies for the development of rural areas and agricultural enterprises); Klaus G. Bielefeld (German researcher, working on the integration of Internet technologies into agriculture, including the creation of portals/websites for farms to facilitate access to markets, as well as to improve efficiency and interaction with customers).

These scientists and their research help develop and improve digital tools for farmers and agrarians, including portals/websites and online platforms for efficient business operations.

Also the following scientists are actively involved in the issues of scientific research in this area: Molchanov V.P. [1,2], Pasichnik V.V. [3], Lubko D.V. [4], Kompaneets M.O. [5], Zadorozhna N.T. [6], Kuznecova T.V. [6], Demian Conrad [7], Rob van Leijsen [7], Christoph Grünberger [8], Elizabeth Castro [9], Douglas Van Duyne [10], Julius Wiedemann [11].

Formulation of the purpose of the article. The purpose of this article is to conduct a feasibility analysis and develop and describe methods for designing digital platforms for farms.

The main part. Developing a digital portal for farming is an important component for promoting and developing a business.

Let's develop a step-by-step methodology that will help you create such a digital portal/site:

Stage 1. Planning and analysis.

- Portal purpose. Determine the main purpose of your portal/site: will it be an online store for selling products, or an informative site for getting to know your services?
- Audience. Determine who will be the primary users of the portal/site. This could be customers, partners, or investors.
- Basic features. Think about what features you need (order form, contact form, map, product gallery, farm information).
- Competitors. Review your competitors' portals/sites. This will help you understand what features are popular in your niche.

Stage 2. Creating a portal/site structure (portal map).

Create a portal map that includes the main sections:

- Home page. Brief information about the farm, its products and uniqueness.
- About us. Learn more about the farm, its history, mission, and goals.
- Products/Services. A list of products or services with descriptions, prices, and photos.
- Gallery. Photos of the farm, the work process, your products.
- Contacts. Address, phone, e-mail, feedback form.
- Blog/News. A place for publishing news about farming, seasonal offers, etc.

Stage 3. Choosing a domain and hosting.

- Domain. Choose a short and memorable domain that reflects the name of your farm or activity (for example, "farmer-xyz.com").



- Hosting. Choose a reliable hosting provider to ensure stable operation of the portal/site. You can choose hosting with WordPress support or other specialized solutions.

Stage 4. Portal/site design.

- Template or custom design. You can choose a ready-made template or order a custom design from a web designer.

- Ease of use. Pay attention to navigation on the portal/site, it should be simple and understandable for visitors.

- Mobile version. Make sure that the portal/site is adapted for mobile devices. This is very important, since many users access sites from smartphones.

Stage 5. Portal/website development.

- CMS (content management system). If you don't have any programming experience, choose a simple CMS like WordPress. It allows you to easily edit content and add new pages.

- Programming. If you need a portal/site with unique features (e.g., a store, an interactive map), you may need a programmer to write custom code.

- Adding content. Add text, photos, videos that describe your farm and products in detail.

Stage 6. SEO optimization.

- Keywords. Use keywords that people search for online to find farms or products. For example, "fresh vegetables delivery" or "organic products."

- Meta tags. Fill in meta tags for each page to make it easier for search engines to index your portal/site.

- Images. Optimize images to load quickly and add alternative texts (alt tags) for images.

Stage 7. Testing.

- Testing on different devices. Check how the portal/site looks on computers, smartphones, and tablets. It should be convenient and fast.

- Functionality testing. Check the operation of all forms (e.g. order forms), buttons, interactive elements.

- Loading speed. Use tools to test the loading speed of your portal/site (e.g. Google PageSpeed Insights). It should open quickly to avoid losing visitors.

Stage 8. Launching the portal/site.

- After testing and correcting all errors, you can launch the portal/site on the Internet.

- Announce the launch on your social networks to draw attention to the new resource.

- Install tools to monitor traffic (e.g. Google Analytics).

Stage 9. Support and updates.

- Content updates. Regularly update the portal, add new photos, blog posts, information about new products or services.

- Security. Check the portal for vulnerabilities and update the software to avoid security issues.

- SEO. Continue working on SEO, adding new keywords and improving content to improve search engine rankings.

Stage 10. Marketing and promotion.

- Social networks. Promote the portal via Facebook, Instagram, YouTube to attract more customers.

- Advertising campaigns. Launch Google Ads or social media advertising campaigns to promote the portal/site.

- Email newsletter. Create an email newsletter for customers to inform them about new products, discounts, and promotions.

This is a basic step-by-step methodology for creating a farm portal. With this plan, your portal will become an effective tool for growing your business.

An example of the home page of a digital portal of a farm is shown in Figure 1-2.



Fig. 1. Example of the main page of a digital portal farming (Ukrainian interface)

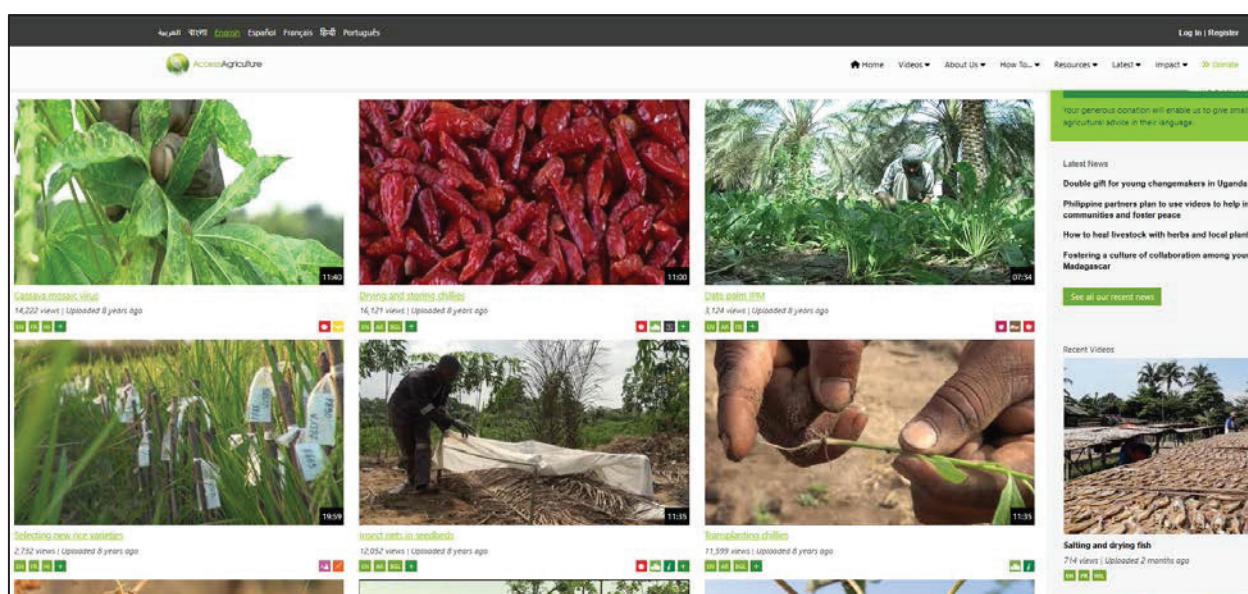


Fig. 2. Example of the main page of a digital portal farming (English interface)

Let's make some preliminary important conclusions and recommendations on the topic of the importance of creating digital platforms (sites) for farms. Namely:

1. *Improving access to markets.* The creation of digital platforms allows farmers to significantly expand their markets by being able to sell their products directly over the internet. This reduces dependence on intermediaries and allows farmers to receive better prices for their products.

Recommendation: Farmers should actively use e-commerce platforms and integrate their websites with online platforms for selling their products. This will improve communication with end consumers and optimize sales channels.

2. *Facilitating interaction with customers and partners.* Digital farm portals/websites are important channels for communication with customers, suppliers, and other partners. This allows not only to conduct transactions, but also to receive feedback, which is important for business development.

Recommendation: It is recommended to include feedback features, chatbots, and inquiry forms on the portal/site to ensure effective communication and increase customer satisfaction.

3. *Business process automation.* Digital platforms allow you to automate many business processes, such as ordering, product accounting, production planning, and reporting. This reduces the burden on staff and reduces the likelihood of human error.

Recommendation: Farms should invest in developing or integrating software to automate on-site processes such as inventory accounting, sales management, and financial management.

4. *Improving marketing and promotion.* A portal/website is a powerful tool for promoting farm products through SEO (search engine optimization) and social media. It allows you to increase your business's visibility on the internet and attract new customers.

Recommendation: It is worth optimizing the portal/site for search engines and using social networks to promote products. Regularly updating content and promotions will help attract the attention of new buyers.

5. *Improving management processes.* Web platforms allow farms to track and analyze data on production, costs, income, and other important indicators. This helps to effectively plan activities and make informed management decisions.

Recommendation: It is advisable for farmers to integrate analytical tools on their websites to monitor and manage key business indicators (KPIs) in order to quickly respond to changes and improve efficiency.

6. *Improving interaction with authorities and financial institutions.* Digital platforms facilitate farmers' access to government support programs, grants, and subsidies, as they make it easy to register, apply, and receive important information about new initiatives.

Recommendation: Farmers should create special sections on their websites with information about available government programs and opportunities for financial support. This will provide convenient access to information and facilitate the process of participating in government initiatives.

7. *Ensuring transparency and trust.* Digital platforms create conditions for transparency in the work of farms, in particular regarding the quality of products, their origin and production conditions. This increases trust on the part of consumers, as they can verify all the necessary information directly on the portal/website.

Recommendation: It is advisable for farmers to provide detailed information on their portals/sites about the production process, product certification, and also publish customer reviews to increase trust in the business.

8. *Creating a platform for innovation and development.* Portals/websites can also serve as a platform for the implementation of innovative technologies such as data management systems, animal health monitoring, precision agriculture, etc. This gives farmers the opportunity to remain competitive in the market and implement the latest agricultural technologies.

Recommendation: It is worth creating integrations with the latest agricultural technologies, such as drones, sensor systems for monitoring, and using the site as a platform for informing customers about new technologies and innovations in the agricultural sector.

Conclusions. Digital platforms (websites) for farms are an essential tool for the development of modern agribusiness. They help facilitate access to markets, optimize business processes, improve



communication with customers and partners, and promote innovation in agriculture. Investing in the development and implementation of digital platforms is a strategically important step for the sustainable development of farms.

References

1. Молчанов В.П. Основи проектування WEB-видань. Конспект лекцій. Харків : ХНЕУ, 2008. 168 с.
2. Молчанов В.П. Технології WEB-дизайну : конспект лекцій. Харків : ХНЕУ, 2011. 212 с.
3. Пасічник В.В. Організація баз даних та знань. Київ : Видавнича група BHV. 2006. 384 с.
4. Лубко Д.В., Нестеренко Є.В. Проектування інформаційного сайту. *Сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем* : матеріали IV Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конференції пам'яті В.В. Овчарова. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 122–123.
5. Компанєтс М.О. Принципи проектування ефективних вебсайтів. *Молодий вчений*. 2015. № 9(2). С. 106–109.
6. Задорожна Н.Т., Кузнецова Т.В., Лупаренко Л.А. Проектування моделі типового сайту наукової установи. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2014. Т. 1. № 39. С. 275–296.
7. Demian Conrad, Rob van Leijsen, David Heritier. *Graphic Design in the Post-Digital Age*. Publisher: Onomatopoe. 2021.
8. Christoph Grünberger. *The Age of Data: Embracing Algorithms in Art & Design*. Publisher: Niggli. 2022.
9. Elizabeth Castro, Bruce Hyslop. *HTML5 and CSS3: Visual QuickStart Guide (Seventh Edition)*.
10. Douglas Van Duynе. *The Design of Sites*. Publisher: Addison-Wesley. 2014. 770 page.
11. Julius Wiedemann. *Web Design: Flashfolios*. Publisher: Taschen, 2017. 456 page.

The article was received by the editorial office of 22.03.2025

Д. В. Лубко¹, Ю. О. Сіциліцин²

¹*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

²*Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького*

ДОЦІЛЬНІСТЬ ТА МЕТОДИ ПРОЄКТУВАННЯ ЦИФРОВИХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ

Анотація

Зазвичай та часто фермерські господарства країни стикаються з кількома проблемами під час реалізації своєї продукції (яку виробляють або вирощують), що суттєво впливає на їхній бізнес. Ось основні з цих проблем: сезонність виробництва; необхідність у великій кількості проміжних ланок (у багатьох випадках продукти фермерів проходять через кілька етапів перед тим, як потрапити до кінцевого споживача (оптові торговці, ритейлери, інші посередники)); недосконала інфраструктура збуту (фермери часто мають обмежений доступ до ринків збуту, через що не можуть ефективно продавати свою продукцію); низька ціна на продукцію; проблеми з якістю та безпекою продукції (без належних стандартів та сертифікацій фермери можуть стикатися з проблемами під час продажу продукції на великих ринках); логістика і транспортування (транспортування продукції на великі відстані може спричинити значні втрати продукції); ризики та невизначеність ринку (ринки сільськогосподарської продукції схильні до значних коливань, що робить фермерів уразливими до змін у попиті або в цінах на їхню продукцію); молодь та відтік кадрів (проблема недостатньої кількості молодих працівників, які б мали бажання працювати в сільському господарстві).

Усі ці проблеми можуть суттєво впливати на ефективність діяльності фермерських господарств і створювати труднощі для їх розвитку.

Ключові слова: цифровий портал, методи проектування, фермерське господарство, сільське господарство, цифровий портал/сайт.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-16>

УДК 514.18

О. Є. Мацулевич¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5553-709X

О. О. Вершков¹, канд. техн. наук

ORCID: 0009-0009-0616-8983

А. П. Чаплінський¹, ст. викладач

ORCID: 0000-0001-9213-5452

М. В. Супрун¹, асистент

ORCID: 0009-0000-5903-1336

¹ Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторногоe-mail: oleksandr.matsulevych@tsatu.edu.ua

МОДЕЛЮВАННЯ МОСТОПОДІБНИХ ПРОТЕЗІВ У ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ DENTCAD

Анотація. Моделювання зубів під час протезування на імплантах – це інноваційна методика в стоматології зі створення тривимірної цифрової моделі майбутньої посмішки пацієнта з урахуванням його анатомічних особливостей: форми, кольору, розташування та розміру зубів, контуру обличчя, рівня ясен тощо. За допомогою спеціальної комп'ютерної програми лікар може побачити найбільш оптимальні для протезування місця, відтворити прообраз майбутніх зубних рядів та продемонструвати пацієнтові можливий результат, щоб обговорити критичні побажання. Застосування комп'ютера та цифрових програм не лише прискорює відповідне лікування, а й дає змогу виключити лікарські помилки.

Цифрові технології CAD/CAM забезпечують повний автоматизований процес створення зубних реставрацій – від цифрових знімків і дизайну до імплантації та протезування. CAD/CAM-технологія – це прогресивна методика, що дає змогу автоматизувати основні етапи створення коронок та інших зубних ортопедичних конструкцій.

У роботі пропонується методика комп'ютерного моделювання зубних протезів із використанням сучасних комп'ютерних технологій та програмних пакетів Delcam Dental, DentMILL, що істотно спрощує та прискорює процес виробництва зубних протезів без втрати якості. Спочатку за результатами цифрового 3D-сканування створюється модель протеза, який ідеально підходить конкретному пацієнтові, а вже після цього всі отримані дані передаються на спеціальне обладнання для виготовлення протезів. Авторам удалося наблизити зубозамінні конструкції до ідеалу, максимально виключивши неточності, і заздалегідь побачити повноцінну модель зубного протеза, у тому числі вже в установленому вигляді, щоб якнайкраще спланувати сам процес протезування.

Ключові слова: протезування зубів, математична модель, синергія клінічних потреб, 3D-сканер, оцифрування, реверсивний інжиніринг, цифрові програми, нижня та верхня щелепи.

Постановка проблеми. Сьогодні зубопротезування є одним із найбільш затребуваних видів лікування у стоматолога. Це пов'язано зі слабким розвитком заходів профілактики захворювань зубів та поганим медичним обслуговуванням, що перейшло до постперебудовної України як спадщина соціалістичних часів. У наші дні українці (і не тільки) прагнуть стати володарями гарної, здорової, «голлівудської» посмішки, і єдиним способом досягти бажаного результату є зубопротезування. Новітні методи протезування зубів передбачають максимальну автоматизацію процесу, тому виникає необхідність у розробленні нових методик виготовлення зубних протезів в автоматизованому режимі без утручання людини.

Аналіз попередніх досліджень. Еволюція методів моделювання зубних протезів не є випадковим процесом, а зумовлена комплексом взаємопов'язаних чинників. Традиційні методи, незважаючи на свою тривалу історію застосування, мають іманентні обмеження: вони трудомісткі, значною мірою залежать від індивідуальних навичок та досвіду зубного техника, а також схильні до потенційних неточностей через усадку відбиткових та модельних матеріалів. Відтво-

рення складних анатомічних форм та індивідуальних особливостей пацієнта часто стає викликом. Водночас зростаючі вимоги пацієнтів до естетики та функціональності зубних протезів, а також прагнення стоматологів до більш передбачуваних та відтворюваних результатів лікування стимулювали активний пошук нових, більш досконалих технологічних рішень. Розвиток комп'ютерних технологій, зокрема потужного програмного забезпечення для тривимірного моделювання, та прогрес у галузі матеріалознавства створили необхідну технологічну базу для широкого впровадження цифрових підходів у стоматологічну практику. Переваги цифрових методів, таких як вища точність завдяки прямому скануванню та комп'ютерному контролю виробництва, значне скорочення часу на виготовлення, можливість віртуального планування та візуалізації результату для пацієнта, а також покращена комунікація між лікарем, техніком та пацієнтом, стали очевидними та сприяли їх швидкій адаптації та поширенню в клінічній практиці. Таким чином, перехід до цифрового моделювання є результатом синергії клінічних потреб, технологічного прогресу та економічних міркувань, таких як оптимізація робочого часу та ресурсів. Це не просто заміна інструментарію, а фундаментальна зміна парадигми в ортопедичній стоматології, що відкриває нові горизонти для підвищення якості лікування.

Формулювання мети статті. Виходячи з вищезазначеного, можна зробити висновок про необхідність розроблення нових методів автоматизованого зубопротезування з використанням пакетів прикладних програм Delcam та Autodesk Inventor.

Основна частина. Моделювання зубного протезу починається з виготовлення та сканування зліпка щелепи.

Як приклад візьмемо виготовлення зубних протезів нижньої та верхньої щелеп конкретного пацієнта.

Виготовлення зліпка щелепи починається з консультації фахівця та санації ротової порожнини. Для цього необхідно зробити панорамний знімок щелеп (рис. 1).



Рис. 1. Панорамний знімок щелеп пацієнта

На основі панорамного знімку стоматолог робить висновок про стан ротової порожнини і про подальші процедури. Якщо стан щелеп пацієнта задовольняє вимогами протезування, із них знімаються обернені відбитки, на основі яких робляться зліпки щелеп.

Сканування зліпка щелепи виконується на 3D-сканері, що є дуже важливою процедурою: від даних, отриманих скануванням, залежать точність отриманої пізніше моделі та точність ліній препарування.

Зліпок (рис. 2) фіксується на стенді в сканері (рис. 3), після чого задаються стратегія та параметри сканування. У цій операції важливо розташувати зліпок правильно, щоб сканер

зміг точніше відсканувати елементи зліпка, у нашому випадку це препаровані зуби верхньої щелепи.



Рис. 2. Зліпок щелепи



Рис. 3. Стенд сканера

Далі починається оцифрування зліпка (рис. 4). Після завершення готову математичну модель (рис. 5) передаємо у форматі STL програмний пакет для реверсивного інжинірингу SolidCAD.

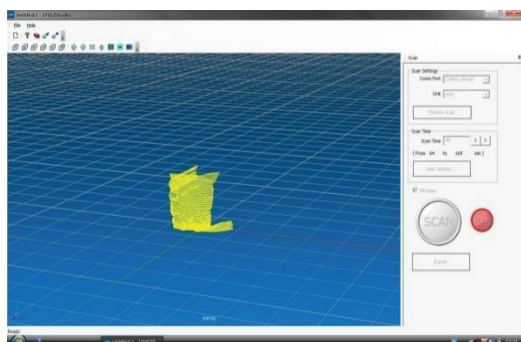


Рис. 4. Оцифрування зліпка

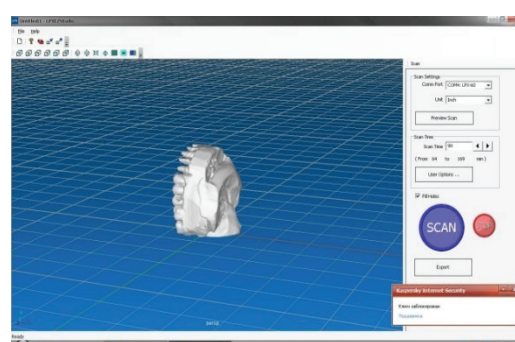


Рис. 5. Математична модель

У SolidCAD робимо обробку відсканованої моделі (рис. 6), готуючи її для використання у спеціалізованій системі тривимірного моделювання зубних мостів та коронок DentCAD, виправляємо неправильно з'єднані трикутники, вирізаємо зайві фрагменти (рис. 7–9).

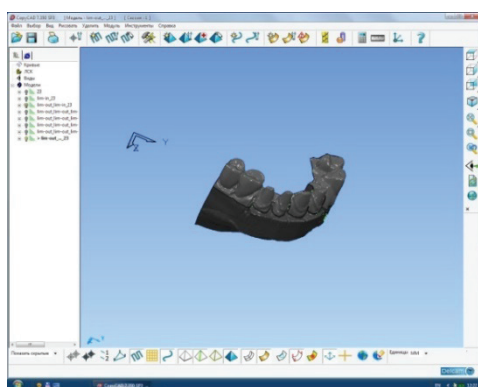


Рис. 6

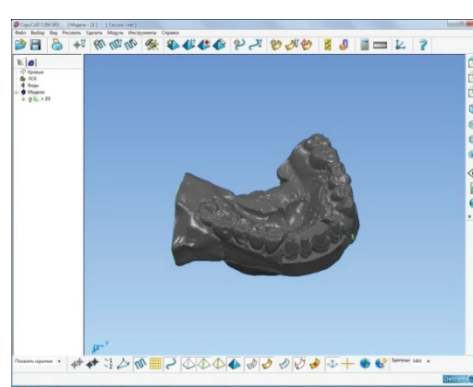


Рис. 7

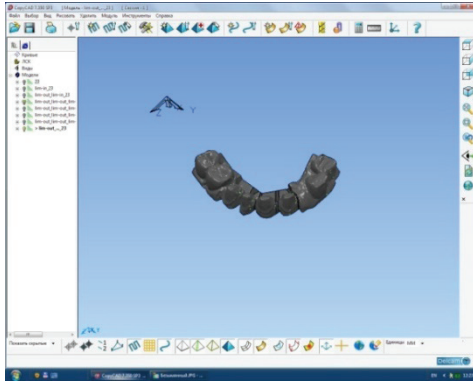


Рис. 8

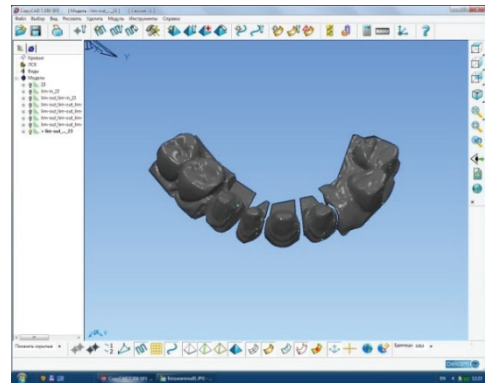


Рис. 9

Завдяки комп'ютерному моделюванню під час протезування зубів можна ще до початку роботи побачити, якими будуть нові зуби, і вибрати оптимальний варіант зовнішнього вигляду та встановлення протеза. Адже зуби у всіх різні: великі та маленькі, округлі, прямокутні або квадратні, і для кожного типу обличчя підійдуть свої форма та розмір зубів.

У DentCADi можливе моделювання будь-яких зубів, ми будемо виготовляти каркас моста з товщиною стінки зуба 0.6 мм.

Для цього вибираємо потрібні нам зуби на віртуальній моделі щелепи у програмі (рис. 10) та тип протезованих зубів. Після вибору зубів відкриваємо математичну модель зліпка, відредаговану в SolidCAD, і на ній вибираємо препаровані зуби, як указує програма, так само вибираємо ясна, на яких розташуємо зубний протез (рис. 11).

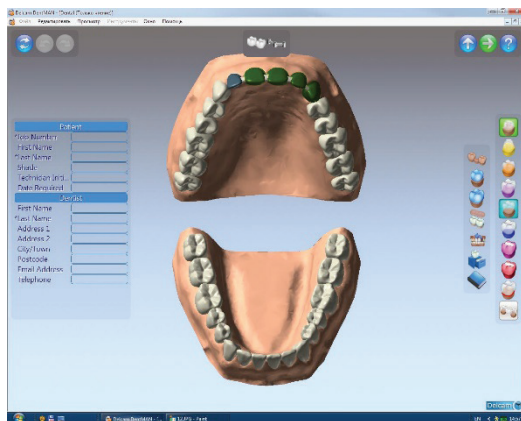


Рис. 10. Віртуальна модель щелепи

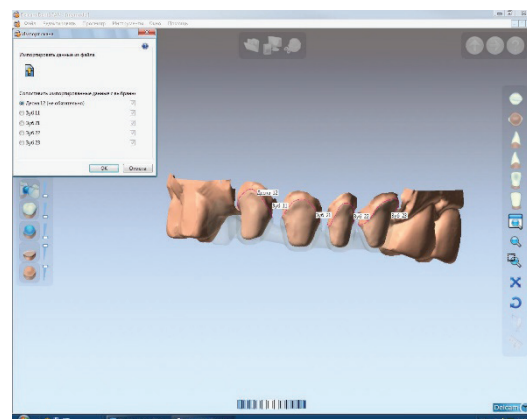


Рис. 11. Модель зубного протезу

Після цього виправляємо лінію препарування, яку створила автоматично програма DentCAD (рис. 12–15).

Наступним етапом проєктування є орієнтування зубопротезу (відсутнього зуба), який програма створила, на підставі відсканованих даних (рис. 16). Після цього отримуємо модель каркаса у віртуальному вигляді (рис. 17); уже зараз можна оцінити правильність виконання моделі та виправити недоліки.

Важливим етапом проєктування є редагування товщини коронної основи (рис. 18, 19).

Потім робимо редагування напрямку посадки моста (рис. 20) та докладніше проєктуємо з'єднувальні частини зубного мосту (рис. 21).

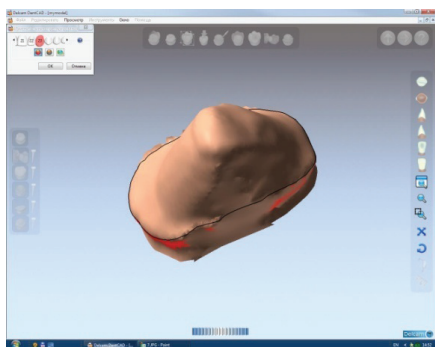


Рис. 12

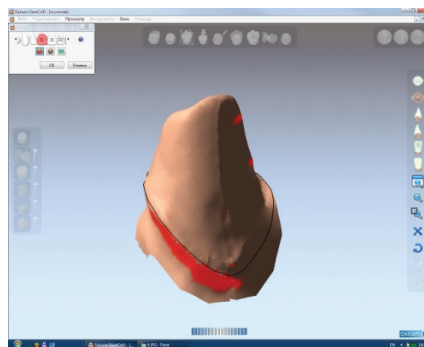


Рис. 13

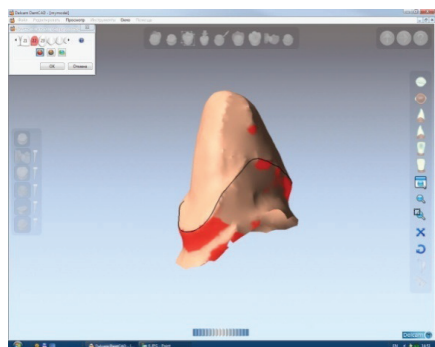


Рис. 14

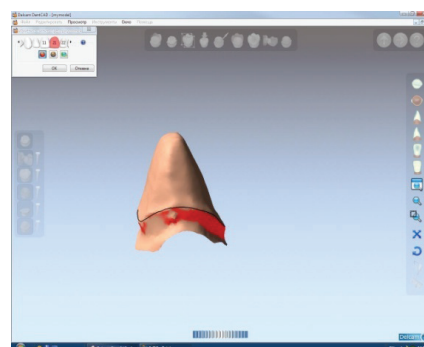


Рис. 15

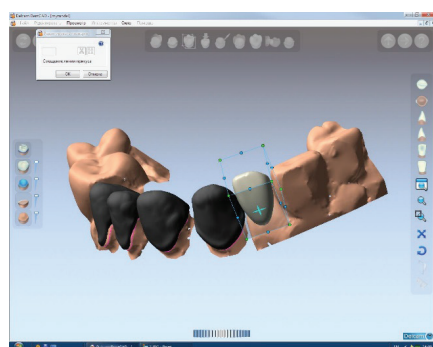
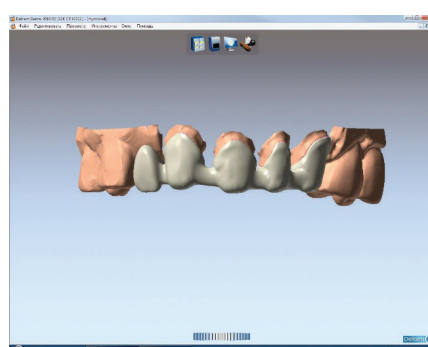
Рис. 16. Орієнтування зубопротезу
(відсутнього зуба)Рис. 17. Модель каркаса у віртуальному
вигляді

Рис. 18



Рис. 19

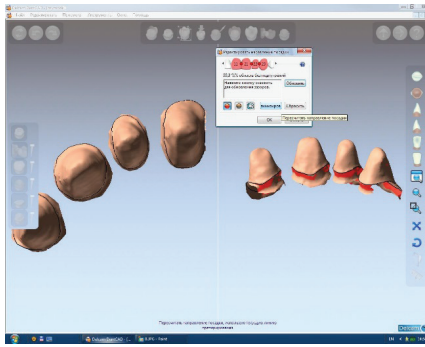


Рис. 20. Редагування напрямку посадки моста

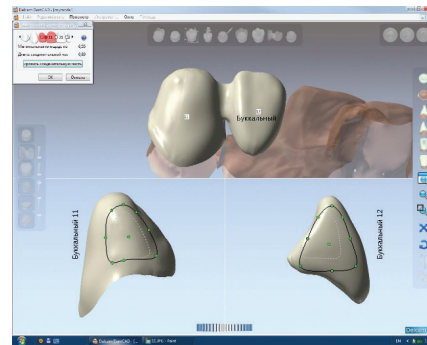


Рис. 21. Проектування з'єднувальних частин зубного моста

Після цього отримуємо каркас зубного протеза у загальному вигляді (рис. 22).

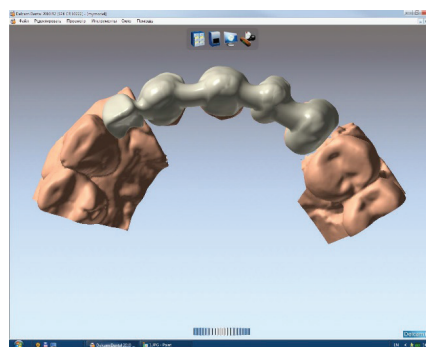


Рис. 22. Каркас зубного протеза у загальному вигляді

Висновки. Запропонована в роботі методика комп'ютерного моделювання зубних протезів із використанням сучасних комп'ютерних технологій та програмних пакетів Delcam Dental, DentMILL істотно спрощує та прискорює процес виробництва зубних протезів без утрати якості, наближає до ідеалу зубозамінної конструкції та дає змогу заздалегідь побачити повноцінну модель зубного протеза.

Список використаних джерел

1. Програмування фрезерної трьохкоординатної обробки за допомогою пакета PowerMill. Практикум. URL: www.delcam.com/
2. Дмитрієв Ю.О. Конспект лекцій із дисципліни «Інформаційні технології у виробництві» Мелітополь : ТДАТУ, 2019.
3. Михайленко В.Е. Кислюк В.Н., Лященко А.А. Геометрическое моделирование и машинная графика в САПР : учебник Киев : Вища школа, 1991. 374 с.
4. Сегментація медичних зображень методом фрактальної кластеризації / О.В. Залевська та ін. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. Вип. 24. Т. 3. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-3-13.
5. Залевська О.В. Аналіз томографії злоякісної плеоморфної аденоми правої привушної зони за допомогою фрактальної апроксимації. *Науковий вісник МДПУ ім. Б. Хмельницького*. 2014.
6. Alrefo I.F., Rawashdeh M.O., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun, O. Designing the functional surfaces of camshaft cams of internal combustion engines. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2024, (3), pp. 72–78. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/072>.
7. Alrefo I.F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2023, 4, pp. 82–88. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>. ISSN 2071-2227, E-ISSN 2223-2362. (Q3).



8. Мацулевич О.Є. Застосування спеціалізованої PLM-системи Technologi CS при розробці автоматизованої системи ведення конструкторсько-технологічних баз даних підприємства сільськогосподарського машинобудування. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. Вип. 24. Т. 1. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-1-13.
9. Програмування автоматизованих процесів обробки деталей : навчально-методичний посібник. Лабораторний практикум / Ю.О. Дмитрієв та ін. Мелітополь, 2022. 170 с.
10. Мацулевич О.Є., Щербина В.М., Залевський С.В. Автоматизація процесу геометричного моделювання робочих поверхонь насадок для фонтанів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 8. Т. 1. С. 55–68.
11. Мацулевич О.Є., Зінов'єва О.Г. Розв'язання задач аналізу тренд-сезонних часових рядів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 19(2). С. 264–270.
12. Михайленко О.Ю., Антонова Г.В. Технологія формоутворення елементів каркасу динамічної поверхні. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12. Т. 2. № 26.

Стаття надійшла до редакції 20.04.2025

O. Matsulevych¹, O. Vershkov¹, A. Chaplinskyi¹, M. Suprun¹

¹ *Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

DENTAL BRIDGE MODELING IN THE PROGRAM PACKAGE DENTCAD

Summary

Dental modeling for implant prosthetics is an innovative technique in dentistry for creating a three-dimensional digital model of a patient's future smile, taking into account their anatomical features: shape, color, location and size of teeth, facial contour, gum level, etc. Using a special computer program, the doctor can see the most optimal places for prosthetics, recreate a prototype of future dentition, and demonstrate the possible result to the patient in order to discuss critical wishes with him. The use of computers and digital programs not only speeds up appropriate treatment, but also eliminates medical errors.

Digital CAD/CAM technologies provide a fully automated process for creating dental restorations – from digital images and design to implantation and prosthetics. CAD/CAM technology is a progressive technique that allows you to automate the main stages of creating crowns and other dental prosthetic structures.

This paper proposes a method for computer modeling of dentures using modern computer technologies and software packages Delcam Dental, DentMILL, which significantly simplifies and accelerates the process of denture production without loss of quality. First, a model of a prosthesis is created based on the results of a digital 3D scan, which ideally fits a specific patient. After that, all the obtained data is transferred to special equipment for manufacturing the prosthesis. The authors managed to bring the dental prosthesis designs closer to the ideal, eliminating inaccuracies as much as possible, and to see a full-fledged model of the denture in advance, including the already installed form, in order to best plan the prosthetics process itself.

Keywords: dental prosthetics, mathematical model, synergy of clinical needs, 3D scanner, digitization, reverse engineering, digital programs, lower and upper jaw.



МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯМИ)

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-17>

УДК 331.108

Г. І. Дашивець, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2612-6077

О. В. В'юник, інженер

ORCID: 0000-0002-6413-5567

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: galyna.dashyvets@tsatu.edu.ua

ВПЛИВ ПОКАЗНИКІВ РОБОЧОЇ СИЛИ НА ЯКІСТЬ РЕМОНТУ МАШИН

Анотація. Основною метою роботи було виявлення і дослідження комплексних та одиничних показників рівня робочої сили сервісного підприємства, які впливають на якість ремонту машин. На рівень робочої сили впливають кваліфікація робітників, їхнє ставлення до роботи, дисципліна праці і технології. Виконано ранжування всіх показників; за результатами експертної оцінки встановлено вагомість комплексних і одиничних факторів виробничих ресурсів; побудовано діаграми коефіцієнтів вагомості для показників. Серед показників кваліфікації найбільш вагомим виявився показник рівня знання технології; серед показників ставлення до роботи – показник якості робіт; серед показників дисципліни праці та технології – показник технологічної дисципліни. Розглянуті чинники дали змогу сформулювати основні напрями підвищення якості праці виконавців, що призведе до підвищення якості ремонту машин.

Ключові слова: якість ремонту машин, робоча сила, експертна оцінка, діаграма, кваліфікація робітника.

Постановка проблеми. Заданий рівень якості машин установлюють, забезпечують і підтримують під час їх конструювання, виробництва та експлуатації, які здійснюють шляхом систематичного контролю та цілеспрямованого впливу на умови та чинники, що впливають на якість.

На поліпшення технологічних процесів, підвищення ефективності виробництва та забезпечення відповідності сучасним вимогам спрямована професійна діяльність фахівців із технічного обслуговування та ремонту машин під час їх експлуатації. Фахівці повинні постійно оновлювати свої знання та навички, щоб успішно впроваджувати та працювати з новими технологіями та підходами у своїй професійній діяльності.

Для забезпечення високої якості робіт необхідно визначити показники рівня робочої сили та їхній вплив на якість сервісних послуг.

Аналіз останніх досліджень. Якість – це сукупність властивостей і характеристик продукту, що надають йому спроможність задовольняти зумовлені або передбачувані потреби [1]. Питанням, пов'язаним з якістю продукції, присвячено праці таких науковців, як: Ю.П. Адлер, Ю.В. Бібік, Р.В. Бичківський, У.Е. Деминг, Дж. Харінгтон О.М. Криворучко, К. Ісікава, Ф. Котлер, Т. Нагао, В. Парето, М. Портер [1–8], у яких система якості розглядається як сукупність організаційної структури, методик, процесів і ресурсів, необхідних для здійснення управління якістю.

Формулювання мети статті. Дослідження показників рівня робочої сили, що впливають на якість ремонту машин в умовах сервісного підприємства, тому що якість робочої сили є визначальним чинником зростання продуктивності праці та підвищення ефективності виробництва.

Основна частина. Управління якістю робіт на сервісному підприємстві – це постійний планомірний процес впливу для вдосконалення технологічних методів і організаційних форм, які



формують технічний рівень робіт. Тобто якість ремонту машин змінюється під дією комплексу заходів, ефективність яких зумовлена великою кількістю одночасно діючих змінних факторів. При цьому зростання якості оцінюється за зміною показників, за допомогою яких виконуються кількісні виміри оцінки якості [7; 8].

Комплексність управління якістю виражається у єдності технічних, організаційних, економічних і соціальних заходів, основними з яких є:

- застосування прогресивних форм організації виробництва;
- упровадження високопродуктивного механізованого та автоматизованого технологічного обладнання;
- використання технологічних процесів ремонту, заснованих на останніх досягненнях науки і техніки;
- удосконалення організації матеріально-технічного забезпечення виробничих підрозділів;
- застосування технічної документації на ремонт, що відповідає вимогам чинних державних стандартів;
- суворе дотримання технологічної і трудової дисципліни, забезпечення точного виконання виробничого процесу;
- систематичне підвищення рівня технічної підготовки кадрів;
- застосування передових форм оплати праці, матеріального і морального стимулювання виконавців;
- поліпшення соціально-побутових умов праці;
- систематичне вдосконалення робочих місць на основі планомірного проведення їх атестацій.

На якість ремонту машин впливає рівень виробничих ресурсів, які складаються з таких чинників: забезпеченість та якість технологічної бази, охоплення та якість інженерної підготовки виробництва, рівень робочої сили [9]. Своєю чергою, ці комплексні чинники складаються з одиничних показників, для яких встановлено п'ять ступенів їхніх можливих значень. Співвідношення між ступенями одиничних факторів: дуже високий, високий, середній, низький, дуже низький. Високий рівень орієнтовно визначає 1 категорію якості, середній рівень – той, що склався в середньому стан виробничих ресурсів, а низький та дуже низький рівні – недопустимі значення виробничих ресурсів, коли слід приймати термінові заходи на підприємствах, де це має місце.

Забезпеченість та якість технологічної бази зумовлюються забезпеченістю ремонтно-технологічним обладнанням, оснасткою та пристосуваннями, контрольно-вимірювальними інструментами, запасними частинами і матеріалами [10].

Охоплення та якість інженерної підготовки виробництва залежать від контролю і підтримання стабільності технологічного процесу, організації робочих місць виконавців, організації праці виконавців [11].

На рівень робочої сили впливають кваліфікація робітників, їхнє ставлення до роботи, дисципліна праці та технології.

Під робочою силою в економічній літературі розуміють здатність до праці певної якості, а сама праця є реалізацією цієї здатності [12]. Робоча сила включає у себе фізичні та інтелектуальні здібності людини, які використовуються у виробництві життєвих благ. Носієм здатності до праці є людина. У низці випадків робочою силою вважають реальних і потенційних працівників (трудові ресурси).

Робоча сила розвивається в процесі трудової діяльності, коли людина втілює свою свідому мету, удосконалює трудові навички, набуває виробничого досвіду, накопичує технічні та виробничі знання, отримує освіту та кваліфікацію. Для ефективного керування якістю робочої сили



необхідна її кількісна оцінка, яка до того ж дасть змогу визначити вплив якості робочої сили на основний показник ефективності роботи підприємства – рівень продуктивності праці [13]. Для цього може бути використаний інтегральний критерій якості робочої сили, що містить основні показники професійно-кваліфікаційного розвитку робітників підприємства: кваліфікаційний розряд, стаж роботи, вік робітника, рівень його освіти та ін. Критерій ураховує співвідношення фактичних показників згідно з даними підприємства з оптимальними показниками, які забезпечує запланований рівень продуктивності праці.

Кваліфікація – це ядро розуміння праці як здатності до роботи. Найчастіше кваліфікація розуміється як ступінь та рівень професійної готовності людини до роботи. Загальновизнано, що кваліфікація включає такі характеристики, як знання, навички, досвід [14]. Між цими компонентами є не лише взаємозв'язок, а й певною мірою заміщуваність.

Ремонт машин виконують робітники різних кваліфікацій та спеціалізації. Згідно з Єдиним тарифно-кваліфікаційним довідником, усіх робітників за кваліфікацією поділяють на шість розрядів. Кожен розряд характеризує складність виконуваних робітником операцій, що виражається тарифним коефіцієнтом, який дає змогу визначити годинну тарифну ставку для всіх розрядів [15].

Додатковою характеристикою робочої сили є інноваційність. Це здатність працівника до розроблення нових ідей, нових технологій, нових виробів, спрямованих на підвищення власної продуктивності праці, ефективності роботи підприємства. Якщо сам характер виробництва вимагає від працівників самостійності та ініціативи, то вимоги до робочої сили повинні відповідати вимогам інноваційності, яка тісно пов'язана з якістю, що називається ставленням до роботи.

Категорія «ставлення до праці» зазвичай сприймається як психологічна характеристика працівника, коли психологи, керівники говорять про одних людей як про сумлінних працівників, а інших людей трактують як тих, що відносяться до роботи абияк. Водночас до розуміння цієї категорії можна підійти і з іншого боку, з огляду на саму природу трудового процесу, коли одні види робіт вимагають високого ступеня уваги і відповідальності, а до інших видів робіт не висуваються такі високі вимоги. Але є й такий аспект: наскільки повно людина реалізує себе в трудовій діяльності. Іншими словами, яка ступінь реалізації трудового потенціалу конкретної людини на конкретній роботі. Нарешті, є аспект аналізу, який пов'язаний із тим, що ставлення до роботи є важливим чинником ефективності виробництва.

За результатами експертної оцінки встановлено вагомість комплексних та одиничних факторів виробничих ресурсів. Результати розрахування коефіцієнтів вагомості факторів, що характеризують робочу силу, наведено в табл. 1 і показано на діаграмах (рис. 1–4).

Таблиця 1

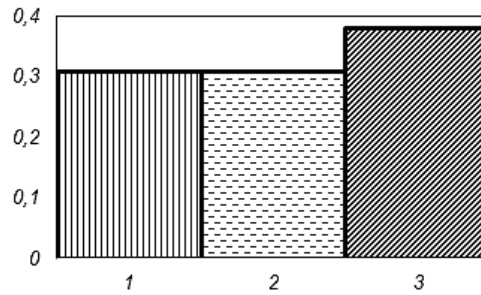
Ознаки рівня робочої сили

Найменування показника	Рівні ознак
<i>Кваліфікація</i>	
Розряд робочого	- 5; 6 - 4 - 3 - 1; 2 - без розряду
Стаж роботи (досвід)	- більше 10 років - 5–10 років - 2–5 років - 1–2 роки - менше 1 року

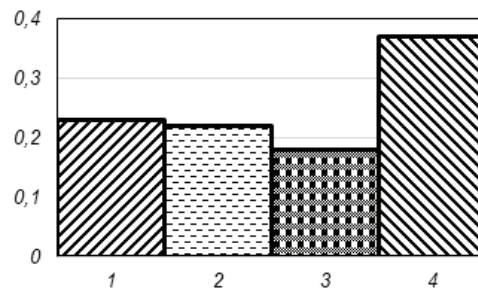


Продовження таблиці 1

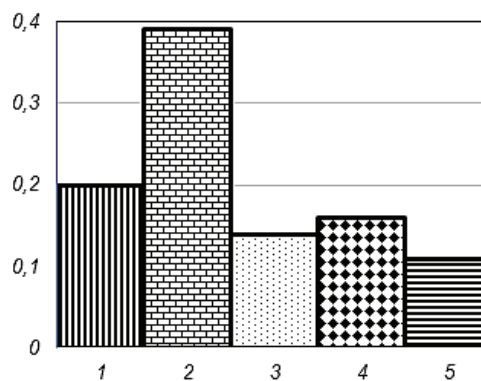
Найменування показника	Рівні ознак
Освіта	- вища освіта рівня молодшого спеціаліста - середня спеціальна: коледж, технікум, училище - профільна середня освіта - повна загальна середня - неповна загальна середня
Рівень знання технології	- знає до тонкощів - широкі та глибокі - добре знає свою ділянку роботи - уявлення слабкі - практично не знає
<i>Ставлення до роботи</i>	
Виконання норм	- постійно перевиконує - перевиконує - виконує - іноді не виконує - рідко виконує
Якість робіт	- дуже висока - претензій немає - іноді претензії - часті претензії - дуже низька
Стан інструменту	- повний, частково оригінальний - повний, справний - повний, але несправний - у поганому стані - практично ні
Індивідуальна продуктивність праці	- дуже висока - висока - середня - низька - дуже низька
Утримання робочого місця	- у повному порядку - у порядку - деякий безлад - бруднувато - повний безлад, бруд
<i>Дисципліна праці та технології</i>	
Використання робочого часу	- утрат немає, допоміжні роботи виконуються до початку зміни - втрат немає - є внутрішньозмінні втрати - іноді прогули або запізнення - часті прогули або запізнення
Розвиток навичок і професійного росту	- постійне підвищення кваліфікації і освоєння нових навичок - використання нових методик і технологій - періодичне використання нових методик і технологій - іноді цікавляться новинами - ніколи не цікавлять інформаційні новини
Старанність	- ініціативний, сумлінний виконавець - беззаперечний виконавець - байдужий виконавець - здебільшого виконує - часто не виконує
Технологічна дисципліна	- немає порушень технології - невеликі відхилення з об'єктивних причин - невеликі відхилення від технології із суб'єктивних причин - неповне знання технологічних вимог і їх невиконання - дуже часто порушує



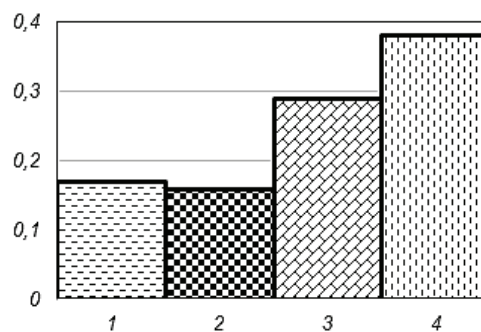
**Рис. 1. Діаграма коефіцієнтів вагомості показників рівня робочої сили:
1 – кваліфікація, 2 – ставлення до роботи, 3 – дисципліна праці та технології**



**Рис. 2. Діаграма коефіцієнтів вагомості показника кваліфікація робочої сили:
1 – розряд робітників, 2 – стаж роботи, 3 – освіта, 4 – рівень знання технології**



**Рис. 3. Діаграма коефіцієнтів вагомості показника ставлення до роботи робітників:
1 – виконання норм, 2 – якість робіт, 3 – стан інструменту, 4 – індивідуальна продуктивність праці, 5 – утримання в порядку робочого місця**



**Рис. 4. Діаграма коефіцієнтів вагомості показників дисципліни праці робітників та технології:
1 – використання робочого часу, 2 – розвиток навичок і професійного росту, 3 – старанність, 4 – технологічна дисципліна**



У комплексному показнику робочої сили на перше місце експерти поставили дисципліну праці та технології (38%), а кваліфікації та ставленню до виконуваної роботи дали однакові (31%) місця.

У комплексному показнику кваліфікації експерти висунули на перше місце неформальний показник – рівень знання технології.

Щодо показника ставлення до виконуваної роботи, то тут на першому місці якість виконання роботи, а на другому – стан робочого місця та інструменту, що з першого ж погляду більш-менш характеризує виконавця робіт.

У показника дисципліни праці домінуючими є технологічна дисципліна, що є основним чинником недостатньої якості ремонту.

Висновки. Однією з обов'язкових умов підвищення якості ремонту машин є зміцнення робочої сили, тому що якість знаходиться в руках безпосередніх виконавців ремонтних робіт. Унікальні навички та здібності робочої сили, уміння адаптувати їх до постійно мінливих умов, висока кваліфікація стають провідними виробничими ресурсами. Таким чином, виявлення характеристик рівня робочої сили має не лише теоретичне, а й прикладне значення. Отримані результати експертної оцінки вагомості факторів виробничих ресурсів дадуть змогу застосувати заходи з підвищення точності діагностики, скоротити час виконання робіт, поліпшити якість ремонту та обслуговування машин, а також знизити ймовірність помилок.

Підтримання якості робочої сили на рівні, необхідному підприємству, повинно здійснюватися через безперервний розвиток робочої сили і проведення постійного моніторингу відповідно до її якості технічному рівню виробництва. Розвиток робочої сили на підприємстві необхідно проводити у напрямках: освоєння робітниками декількох професій із метою забезпечення їх взаємозамінності; підвищення мотивації робітників до участі в інноваційній діяльності; планування перепідготовки і підвищення кваліфікації кадрів за переходу на ремонт нових об'єктів; застосування індивідуального підходу до навчання, відродження інституту наставництва.

Список використаних джерел

1. Мережко Н.В. Осієвська В.В., Ясинська Н.С. Управління якістю : підручник. Київ : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2010. 216 с.
2. Ben-Daya M., Salih O. Duffuaa, Abdul Raouf. Maintenance, Modeling and Optimization. New York, Springer Science Business Media, 2000. 474 s.
3. Campbell J.D., Andrew K.S. Jardine. Maintenance Excellence: Optimizing Equipment Life–Cycle Decisions Mechanical Engineering. New York, Marcel Dekker Inc., 2010. 495 s.
4. Dhillon B.S. Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers. Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 214 p.
5. Nakagawa T. Maintenance. Theory of Reliability. Springer Series in Reliability Engineering: London, Springer. Verlag Limited, 2005. 269 s.
6. Kobbacy K.A.H., D.N. Prabhakar Murthy. Complex System Maintenance Handbook. Springer Series in Reliability Engineering: London, Springer Verlag Limited, 2008. 657 s.
7. Білецький Е.В., Янушкевич Д.А., Шайхлісламов З.Р. Управління якістю продукції та послуг. Харків : Харків. торг.-економ. інститут, 2015. 222 с.
8. Криворучко О.М. Менеджмент якості на підприємствах автомобільного транспорту: теорія, методологія і практика : монографія. Харків : ХНАДУ, 2006. 404 с.
9. Дашивець Г.І., Паніна В.В., Бондар А.М. Вплив рівня виробничих ресурсів на якість ремонту машин. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2021. Вип. 11. Т. 1. С. 10. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-1-20.
10. Дашивець Г.І., Бондар А.М., В'юник О.В. Вплив технологічної бази на підвищення рівня виробничих ресурсів сервісного підприємства. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2022. Вип. 12. Т. 3. С. 92–101. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-3-9.



11. Дашивець Г.І., Бондар А.М., В'юник О.В. Вплив рівня інженерної підготовки виробництва на якість ремонту машин. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2022. Вип. 12.Т. 1. С. 84–93. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-1-8.
12. Єсінова Н.І. Економіка праці та соціально-трудові відносини : навчально-методичний посібник. Харків : ХДУХТ, 2012. 397 с.
13. Махсма М.Б. Економіка праці та соціально-трудові відносини. Київ : Європейський університет, 2004. 188 с.
14. Качан Є.П., Шушпанов Є.П. Управління трудовими ресурсами : навчальний посібник. Київ : Юридична книга, 2005. 360 с.
15. Гевко І.Б., Оксентюк А.О., Галушак М.П. Організація виробництва: теорія і практика : підручник. Київ : Кондор, 2008. 176 с.

Стаття надійшла до редакції 31.03.2025

H. Dashyvets, O. Viunyk

Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

THE INFLUENCE OF LABOR FORCE INDICATORS ON THE QUALITY OF MACHINE REPAIR

Summary

The quality of machine repair is influenced by the level of production resources, which consist of the following factors: availability and quality of the technological base, coverage and quality of engineering training of production, level of labor force. Identification and research of complex and single indicators of the first two factors was carried out in previous works.

This work is devoted to determining the labor force indicators that affect the quality of machine repair. The quality of work at service enterprises may be low due to non-compliance with technological and labor discipline, failure to ensure the accurate execution of the production process; unsystematic increase in the level of technical training of personnel; failure to apply advanced forms of remuneration, material and moral incentives for performers.

The level of the workforce is influenced by factors: the qualifications of workers, their attitude to work, labor discipline and technology are complex indicators. In turn, they consist of individual indicators. Thus, for the indicator of the qualifications of the workforce, these are the category of workers, length of service, education, level of knowledge of technology; for the indicator of the attitude of workers to work - compliance with standards, quality of work, condition of the tool, individual labor productivity, maintenance of the workplace in order; for the indicator of the labor discipline of workers and technology – use of working time, development of skills and professional growth, diligence (fulfillment of orders), technological discipline.

A working group of experts developed a questionnaire to assess the impact of factors on the quality of services. Five levels of possible values of single indicators were introduced. The indicators were ranked, and diagrams of weighting coefficients for single factors of the workforce were constructed based on the results of the expert assessment.

Among the indicators of qualification, the most significant indicator was the level of knowledge of technology; among the indicators of attitude to work, the indicator of quality of work; among the indicators of labor discipline and technology, the indicator of technological discipline.

The factors considered allowed us to formulate the main directions for improving the quality of work of performers, which in turn will lead to an improvement in the quality of machine repairs.

Keywords: quality of machine repair, labor, expert assessment, diagram, worker qualification.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-18>

UDC 664.857.081.6:663.81.05

G. Deynichenko ¹, DScTechD. Dmytrevskiy ^{1,2}, PhDD. Honchar ¹, postgraduateV. Chervonyi ³, PhDD. Horielkov ³, PhD

ORCID: 0000-0003-3615-8339

ORCID: 0000-0003-1330-7514

ORCID: 0009-0006-8808-6161

ORCID: 0000-0002-9085-2260

ORCID: 0000-0002-9315-9322

¹State Biotechnological University, Kharkiv²Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University³V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv

e-mail: dmitrevskyidv@gmail.com

REVIEW AND ANALYSIS OF MEMBRANE JUICE PROCESSING IN FOOD INDUSTRY ENTERPRISES

Summary. The equipment used for clarification and concentration of fruit and berry and vegetable juice is analyzed. The technologies for obtaining clarified juice are considered. The characteristic shortcomings of existing technological processes are identified. The directions for improving the processes of concentration and clarification of juice are identified and the need to develop equipment for their implementation is justified. The existing methods of membrane processing are analyzed, as well as new promising directions that have been developed recently. The application of membrane technologies for the processing of juices from fruit raw materials is proposed. The main advantages of introducing membrane technologies into the processing process are given. The shortcomings that complicate the use of membrane technologies in the production process of processing liquid food media are identified. The feasibility of using ultrafiltration and microfiltration membrane plants for clarifying fruit juices is substantiated.

Keywords: membrane processing, juices, fruit and berry raw materials, ultrafiltration, microfiltration.

Formulation of the problem. The modern fruit and vegetable industry must provide the population with products of high nutritional and biological value. One of such products is fruit and vegetable juices, which play an important role in the human diet, as they contain a complex of essential nutrients, including vitamins, macro- and microelements, and other useful components.

Today, the consumption of juices is constantly growing, which is due to their high nutritional value and economic feasibility of production. The use of modern technologies and equipment developed on the basis of the latest scientific achievements helps to optimize production processes and allows for the effective processing of significant volumes of fruits and vegetables for the production of both concentrated and natural juices. Juices contain valuable biologically active substances, such as vitamins, minerals, phenolic compounds, and antioxidants [1].

For example, freshly squeezed juices contain a significant amount of pectin, insoluble biopolymers, lipids, polysaccharides, and other compounds. It is these substances that can cause turbidity. The main reason for this phenomenon is the presence of colloidal particles, which over time coalesce to form a precipitate. Initially, a slight turbidity appears, and then the particles gradually settle [2].

In the process of producing clarified juices, colloidal substances are removed, while in the manufacture of unclarified juices, only partial clarification is used without removing these compounds. Juice clarification is a technological process of separating fruit juice into sediment and a clear liquid. In this case, the colloidal structure of the juice is destroyed, and the concentration of colloidal particles is reduced by 20-30%. As a result of clarification, a liquid phase of the product is obtained, which contains dissolved substances isolated from the fruit tissue [3].



The process of clarification and concentration of juices is a key stage in the production of quality beverages, but it is accompanied by a number of problems that affect the final characteristics of the product and the overall efficiency of the production process. One of the main production problems is the turbidity of the juice and the presence of sediment. This occurs due to the fact that natural colloidal particles, such as pectin, proteins, tannins, form suspensions that are difficult to remove. In this case, clarification using traditional methods such as settling, centrifugation, and the use of enzymes is time-consuming and requires a significant number of auxiliary substances [4].

You should also pay attention to the loss of useful components. Filtration and thermal methods can reduce the concentration of vitamins, phenolic compounds and aromatic substances. Thermal treatment during concentration leads to partial caramelization of sugars and changes in organoleptic properties. During clarification and concentration, equipment becomes contaminated. In this case, the use of traditional filters causes their rapid clogging. At the same time, the equipment for implementing clarification processes has a high energy consumption, since thermal concentration requires large energy costs [5].

In addition, the issue of preserving the natural taste and color of the finished product arises. It is known that during traditional concentration, some volatile aromatic compounds are lost. Some pigments, for example, anthocyanins in berries, are destroyed under the influence of temperature [6]. Membrane technologies, such as microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis, allow you to improve the clarification and concentration of juices, minimizing the loss of quality characteristics of the product.

Analysis of recent research and publications. Juice purification is carried out to ensure colloidal stability of the product during storage, as well as to improve its organoleptic properties and attractive appearance. To comply with international production standards, it is necessary to introduce modern technologies and equipment based on the latest scientific and technical developments [7]. The use of membrane technologies allows to improve the taste characteristics, appearance and nutritional value of fruit juices. An important task of membrane processing is to preserve vitamins, amino acids and other biologically active compounds, which can be achieved by avoiding thermal sterilization and the use of preservatives. Membrane systems contribute to the creation of effective juice concentration technologies and the expansion of the product range [8].

The use of ultrafiltration and microfiltration makes it possible to regulate the mineral and carbohydrate composition of the final product. Today, the main areas of use of membrane technologies in juice production are clarification and concentration processes. Clarification is carried out to destroy the colloidal structure of the juice, remove high-molecular proteins, pectin and polyphenolic substances, as well as microorganisms. It is important to preserve valuable biologically active components, in particular vitamins, sugars, acids, minerals and aromatic compounds [9].

Ultrafiltration is one of the types of membrane technologies widely used in the food industry. It differs in the size of the pores of the membranes, which are used for the distribution, fractionation and concentration of liquids. The diameter of the pores of the membranes varies from 0.01 to 0.20 microns, and the operating pressure is in the range of 0.1–1.0 MPa. Thanks to ultrafiltration, small bacteria, viruses and large protein molecules are removed from the initial solution. As a result, the initial liquid is separated into two products: low-molecular (filtrate), which passes through the membrane and is removed, and high-molecular concentrate [10]. Unlike microfiltration, ultrafiltration can be accompanied by adsorption of dissolved substances on the membrane surface and their intermolecular interaction [11].

In the process of ultrafiltration and microfiltration, semipermeable membranes are used that act as a barrier, passing only certain components of the liquid mixture. They must have high selectivity, significant specific productivity, chemical resistance to the components of the solution and sufficient

mechanical strength. The service life of the membranes largely depends on the process of sediment formation, which can clog the pores, creating additional resistance to fluid flow and mass transfer. This phenomenon, known as concentration polarization, leads to a decrease in membrane performance and is characteristic of most baromembrane processes [12].

Microfiltration effectively removes suspended particles and microorganisms without the use of chemical reagents. Ultrafiltration allows the removal of colloidal substances, pectin compounds and proteins, making the juice transparent. The reverse osmosis method is used to remove water using dense membranes, which allows the juice to be concentrated without heat treatment. Nanofiltration allows partial removal of water and minerals, while preserving sugars and aromatic compounds [13]. The main advantages of membrane technologies include the ability to preserve biologically active substances, such as vitamins, phenolic compounds and antioxidants [14].

The membrane treatment process is characterized by high energy efficiency, since it does not require evaporation of water. Membrane technologies ensure the production of a high-quality final product: the juice becomes clean, transparent and rich in aroma. In addition, the shelf life of the product increases due to the effective removal of bacteria and fungi [15]. Membrane technologies are becoming a promising solution for the production of fruit and berry juices with high organoleptic and nutritional indicators, replacing traditional methods of clarification and evaporation.

Formulation of the purpose of the article. The purpose of the article is to review and analyze membrane processes used for processing fruit and berry juices at food industry enterprises, to determine their advantages, disadvantages, and prospects for use in comparison with traditional technologies for clarification and concentration of juices.

Presentation of the main research material. Baromembrane processes, in particular reverse osmosis, ultrafiltration and microfiltration, are based on the pressure difference across the thickness of membranes, which are usually made of polymeric materials. They are used to separate solutions and colloidal systems at temperatures of 5...30 °C. The difference between reverse osmosis and ultrafiltration from traditional filtration is that instead of the product settling on the filter surface, as in conventional filtration, two solutions are formed in these processes: one of them contains a concentrated solute. It is important to avoid the accumulation of this substance near the membrane, as this can lead to a decrease in its selectivity and permeability. One of the negative factors of baromembrane processes is concentration polarization. It occurs due to the different rates of passage of the mixture components through the membrane, which leads to the accumulation of a substance with a low penetration rate in the membrane boundary layer [16]. This reduces the efficiency of the separation of liquid mixtures, as the driving force of the process decreases, the selectivity and productivity of the membranes deteriorate, and their service life is also shortened. In addition, precipitation of poorly soluble salts and the formation of gel-like high-molecular compounds is possible, which requires periodic cleaning of the membranes. To minimize the effect of concentration polarization and improve the efficiency of membrane systems, mixing is used in the technological process. This helps to equalize the concentration of components in the membrane boundary layer and the main liquid flow. Mixing can be carried out by increasing the flow velocity (up to 3-5 m/s), using turbulizers (for example, meshes, perforated or corrugated sheets, spirals, balls), using ultrasound and other methods [17].

Concentration polarization leads to a decrease in membrane performance due to an increase in the osmotic pressure of the solution, which reduces the driving force of the process. At the same time, precipitation of insoluble salts and gelation of high-molecular compounds are possible, which reduces the permeability and selectivity of the membranes, as well as shortens their service life. To reduce this effect, various technological approaches are used, depending on the design of the membrane apparatus, the type of membrane, the cost of the final product and the performance of the equipment. One of the most effective methods for minimizing concentration polarization is to create turbulence in the

solution. This allows you to reduce the concentration of dissolved substances in the boundary layer, which contributes to an increase in the permeability and selectivity of the membranes, a decrease in osmotic pressure and, accordingly, an increase in the efficiency of the separation process. Additionally, the use of a pulsating flow helps to increase the velocity of the near-wall liquid layers, which reduces the likelihood of sediment formation on the membrane [18].

Concentration polarization is a typical phenomenon for all membrane processes, including microfiltration and ultrafiltration. It consists in increasing the concentration of the dissolved substance on the membrane surface, which reduces its permeability and selectivity, and also shortens its service life. To minimize this effect, various engineering solutions are used, such as creating a turbulent flow in the surface layer of the liquid, which allows accelerating the transfer of the dissolved substance to the center of the flow. Such technologies include the use of magnetic stirrers, vibration devices, increasing the speed of the liquid flow along the membrane and installing turbulators [19].

Another design solution to improve the efficiency of membrane systems is the use of devices with narrow channels. This contributes to the creation of a laminar mode of fluid movement, which allows maintaining high equipment productivity with reduced device dimensions [20].

Increasing the temperature of the liquid can reduce the viscosity of the solution being separated, while increasing the diffusion coefficient of the solute. However, this method may not be suitable for juice purification. It is also possible to apply the effect of ultrasonic vibrations on the membrane boundary layer. The main technological parameters of baromembrane processes are the filtration rate, selectivity and permeability of the membrane components. The main factors affecting the membrane separation processes are temperature, pressure, hydrodynamic conditions and the formation of sediment on the membranes. However, the main factor affecting the microfiltration and ultrafiltration processes is the operating pressure. The driving force of the process increases with increasing pressure and, consequently, the permeability of the membrane increases. The operating pressure is set depending on the filtration process, the solution being separated, the type of membrane, the design of the apparatus, the hydraulic resistance of the intermembrane channel and drainage. The effect of the temperature of the solution on the filtration process is complex. With increasing temperature, the viscosity and density of the solution decrease. At the same time, the osmotic pressure increases [21]. Reduced viscosity and density increase permeability. An increase in osmotic pressure reduces the driving force of the process and reduces the permeability of membranes. When the temperature increases in the processes of microfiltration and ultrafiltration, the permeability and selectivity of the membrane increase. This is due to a decrease in the viscosity of the permeate, as well as a decrease in the influence of concentration polarization on the characteristics of the membranes [22]. With an increase in the concentration of the solution, the driving force of the process decreases, the viscosity and density of the solution increase, and the permeability of the membranes decreases [23]. Concentration also affects the selectivity of the membranes. In solutions of low concentration, the selectivity of the membranes does not change significantly with a change in concentration. An increase in the concentration of solutes in the solution worsens the operation of the membranes, and the specific productivity and selectivity of the apparatus decrease [24]. An increase in concentration increases the osmotic pressure of the solution, which, in turn, reduces the effective driving force of the separation process. Viscosity also increases, which leads to a decrease in mass transfer [25]. The consequence of this is a decrease in the specific productivity of the membranes to a minimum. In this case, the practical use of baromembrane processes becomes impractical.

Figure 1 shows a diagram illustrating the complete membrane juice processing process, showing the flow from the raw material to the final concentrated product.

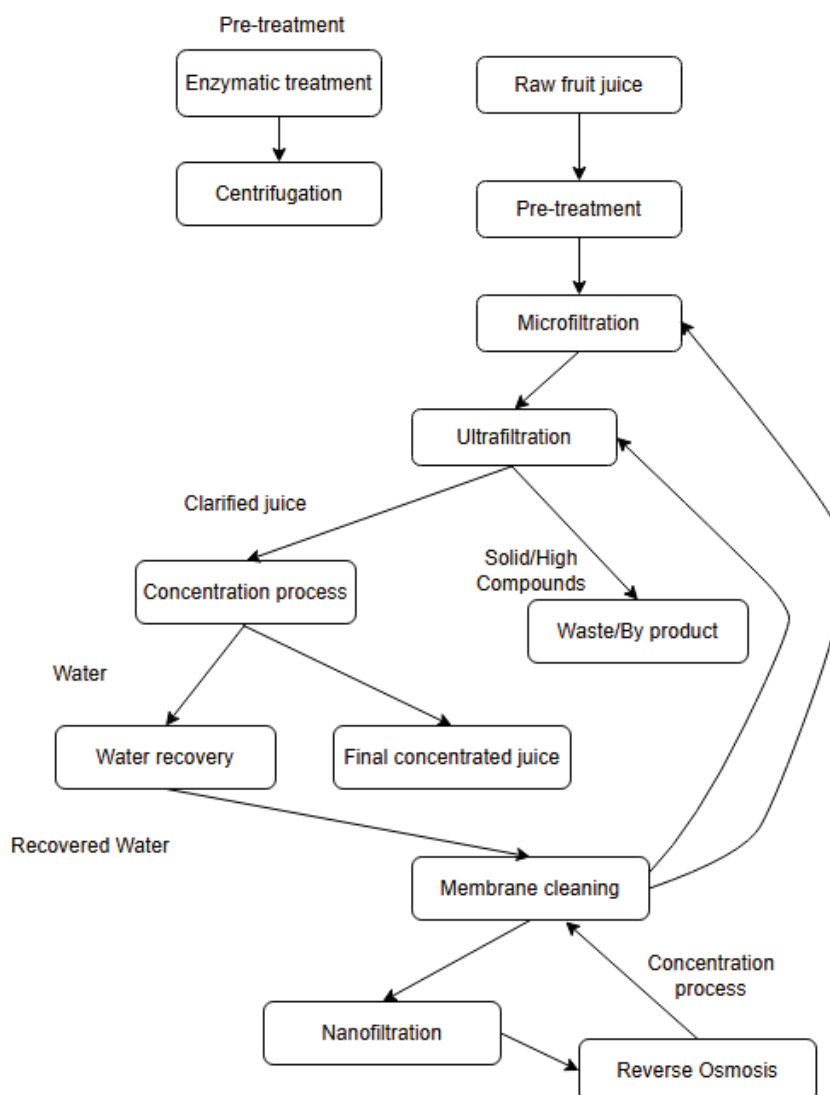


Fig. 1. Scheme of membrane processing of fruit and berry juice

The system receives raw materials, such as fruit juice. In the pre-treatment stage, enzymatic treatment is carried out to break down pectins and other complex molecules. Centrifugation ensures the removal of large particles and pulp. The purification process consists of microfiltration and ultrafiltration. Microfiltration is used mainly for initial clarification. The ultrafiltration process is necessary for fine clarification of the raw materials and the removal of high-molecular compounds, colloids and microorganisms. The next stage is the concentration process. Nanofiltration is the first stage of concentration. At this stage, solids are concentrated to 25-30%. Reverse osmosis is used for final concentration. At this stage, solids are concentrated to 45-50%. During this stage, the permeate water is collected. Auxiliary processes include a water recovery process for stable operation and a membrane cleaning cycle to maintain efficiency. The use of membrane juice treatment solves many traditional problems that arise during juice processing. First of all, it provides operation at low temperatures to preserve nutrients and taste. The need for product clarifiers is eliminated. Energy consumption is also significantly reduced compared to thermal evaporation, microbiological stability of the product and the possibility of its continuous processing are ensured. Dead-end and tangential filtration are widely used in modern food industry enterprises. Dead-end filtration is an effective and

economical method of food purification, and the equipment for its implementation is compact and easy to use. (Fig. 2).

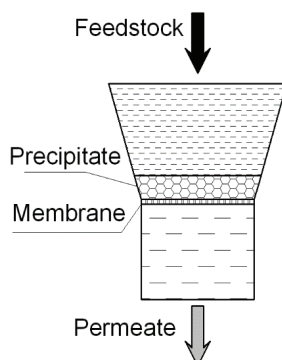


Fig. 2. Dead-end membrane filtration scheme

Tangential filtration is characterized by the passage of the product flow over the surface of the membrane (Fig. 3).

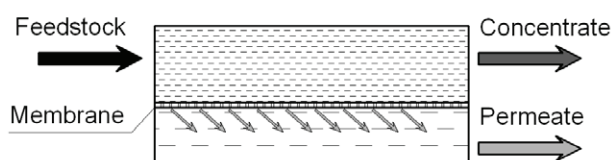


Fig. 3. Tangential membrane filtration scheme

Dead-end and tangential filtration have significant differences. In the process of dead-end filtration, the liquid moves perpendicular to the filter surface, while in tangential filtration the flow is directed parallel to the membrane. Typically, in tangential filtration systems, a circulation pump creates a liquid flow along the membrane, which prevents the accumulation of sediment on its surface. Unlike dead-end filtration, tangential filtration provides a continuous working process, since the pores of the membrane do not clog. In this method, the liquid does not pass through the membrane completely, but moves along it, creating a pressure difference. Part of the liquid penetrates the membrane in the form of filtrate, and the rest of the flow with impurities continues to circulate, cleaning the membrane surface. A characteristic feature of tangential filtration is the recirculation of the concentrate, which helps to reduce membrane fouling, maintains a high filtration rate and ensures maximum product yield. The use of membrane units with tangential filters helps to preserve the structural and organoleptic characteristics of the product. In addition, such filters have the ability to self-clean and do not require significant operating costs.

Conclusions. Membrane technologies are an effective tool for solving key problems during clarification and concentration of fruit and berry juices. They ensure high product quality, energy efficiency and environmental friendliness of production. The complex application of various types of membrane processes (microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis) allows to achieve optimal results and solve most of the problems characteristic of traditional technologies. Studies have shown that the use of ultrafiltration units allows to preserve colloidal substances, while passing all valuable components of the juice, in particular sugars, organic acids, minerals, soluble vitamins and amino acids. Due to this, the nutritional and biological value of clarified juices remains unchanged. The prospect of using microfiltration and ultrafiltration membrane treatment for clarification and concen-

tration of juices from fruit and berry raw materials has been established. The most common in the design of membrane systems are hollow fibers and roll membrane elements, since they provide high productivity and are economically viable.

References

1. Deynichenko, G., Guzenko, V., Dmytrevskiy, D., Chervonyi, V., Omelchenko, O., Horielkov, D., Korolenko, O. Developing a technique for the removing of a gel layer in the process of membrane treatment of pectin extract. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 4(11–106), 63–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208984>
2. Deynichenko, G., Guzenko, V., Dmytrevskiy, D., Chervonyi, V., Kolisnichenko, T., Omelchenko, O., Nykyforov, R. Study of the new method to intensify the process of extraction of beet pulp. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 4(11–94), 15–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140126>
3. Miyoshi, T., Yuasa, K., Ishigami, T., Rajabzadeh, S., Kamio, E., Ohmukai, Y., Saeki, D., Ni, J., Matsuyama, H. Effect of membrane polymeric materials on relationship between surface pore size and membrane fouling in membrane bioreactors, *Applied Surface Science*. 2015. Vol. 330, pp. 351–357. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.018>
4. Zhao, D., Lau, E., Huang, S., Moraru, C.I. The effect of apple cider characteristics and membrane pore size on membrane fouling. *LWT-Food Science and Technology*. 2015. Vol. 64, pp. 974–979. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.07.001>
5. Hutomo, G.S., Rahim, A., Kadir, S. Pectin Isolation from Dry Pod Husk Cocoa with Hydrochloride Acid. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2016. 5(11), 751–756. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2016.511.086>
6. Iskakova, G., Kizatova, M., Baiysbayeva, M., Azimova, S., Izembayeva, A., Zharylkassynova, Z. Justification Of Pectin Concentrate Safe Storage Terms By Pectin Mass Ratio. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 4(11–112), 25–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237940>
7. Jia, T., Zeng, J., Gao, H., Jiang, J., Zhao, J., Su, T., Sun, J. Effect of pectin on properties of potato starch after dry heat treatment. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*. 2019. 18(7), 1375–1384. <https://doi.org/10.4314/tjpr.v18i7.2>
8. Cherevko O.I., Deinychenko G.V., Dmytrevskiy D.V., Guzenko V.V., Heier H.V., Tsvirkun L.O. Application of membrane technologies in modern conditions of juice production. *Прогресивна техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2020. Вип. 2(32). С. 67–77. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4369743>
9. Deinychenko G.V., Dmytrevskiy D.V., Zolotukhina I.V., Perekrest V.V., Guzenko V.V. Directions of improvement of processes of membrane separation of juices from fruit and berry raw materials. *Прогресивна техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2021. Вип. 1(33). pp. 89–98. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5036090>
10. Дейніченко Г.В., Золотухіна І.В., Дмитревський Д.В., Гузенко В.В., Перекрест В.В., Гладкова О.С. Сучасні технології баромембранних процесів у харчовій промисловості. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2021. № 2(43). С. 86–93. <https://doi.org/10.33274/2079-4827-2021-43-2-86-93>
11. David Durán-Aranguren, D., Juliana Alméciga Ramírez, C., Catalina Villabona Díaz, L., Ayalde Valderama, M., Sierra, R. Production of Pectin from Citrus Residues: Process Alternatives and Insights on Its Integration under the Biorefinery Concept. Pectins – *The New-Old Polysaccharides*. *IntechOpen*. 2022. <https://doi.org/10.5772/intechopen.100153>
12. Дейніченко Г.В., Дмитревський Д.В., Гузенко В.В., Афукова Н.О. Аналіз застосування мембранних апаратів для виробництва соків із плодової сировини. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2021. С. 36–43. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2021-21-1-36-43>
13. Deynichenko, G., Dmytrevskiy, D., Guzenko, V., Omelchenko, O., Perekrest, V. Prospects of using equipment for membrane separation of food liquids. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2023. Вип. 13.Т. 2. С. 1–11. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-2-12>
14. Yukun Li, Jianquan Luo, Yinhua Wan. Biofouling in sugarcane juice refining by nanofiltration membrane: Fouling mechanism and cleaning. *Journal of Membrane Science*. Vol. 612, 2020. 118432, ISSN 0376-7388. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118432>

15. Emel Yilmaz, Pelin Onsekizoglu Bagci. Ultrafiltration of Broccoli Juice Using Polyethersulfone Membrane: Fouling Analysis and Evaluation of the Juice Quality. *Food and Bioprocess Technology*, 2019. Vol. 12, pp. 1273–1283. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02292-0>
16. Samreen, Ch V.V. Satyanarayana, L. Edukondalu, Vimala Beera. Srinivasa Rao. Effect of Pre-treatment on Aggregation, Biochemical Quality and Membrane Clarification of Pomegranate Juice. *Indian Journal of Ecology*, 2022. 49(3):910–918. <https://doi.org/10.55362/IJE/2022/3615>
17. David Inhyuk Kim, Gimun Gwak, Min Zhan, Seungkwan Hong. Sustainable dewatering of grapefruit juice through forward osmosis: Improving membrane performance, fouling control, and product quality. *Journal of Membrane Science*, 2019. Vol. 578, pp. 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.02.031>
18. Xiaochan An, Yunxia Hu, Ning Wang, Zongyao Zhou, Zhongyun Liu. Continuous juice concentration by integrating forward osmosis with membrane distillation using potassium sorbate preservative as a draw solute. *Journal of Membrane Science*. Vol. 573, 2019, pp. 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.12.010>
19. Omar, J.M., Nor, M.Z.M., Basri, M.S.M., Che Pa, N.F. Clarification of guava juice by an ultrafiltration process: analysis on the operating pressure, membrane fouling and juice qualities. *Food Research 4*, 2017. (Suppl. 1). pp. 85–92. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(s1\).s30](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(s1).s30)
20. Yee, W.P., Nor, M.Z.M., Basri, M.S. MROslan, J. Membrane-based clarification of banana juice: pre-treatment effect on the flux behaviour, fouling mechanism and juice quality attributes. *Food Research 5*, 2021 (Suppl. 1). pp. 57–64. DOI: [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(s1\).046](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(s1).046)
21. Domingues R.C.C., Ramos A.A., Cardoso V., Reis M.H.M. (2014), Microfiltration of passion fruit juice using hollow fibre membranes and evaluation of fouling mechanisms, *Journal of Food Engineering*. 2014. Vol. 121, pp. 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.07.037>
22. Verma S.P., Sarkar B., Analysis of flux decline during ultrafiltration of apple juice in a batch cell, *Food and Bioprocess Technology*. 2015. Vol. 94, pp. 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.03.002>
23. Sharifanfar, R., Mirsaeedghazi, H., Fadavi, A., Kianmehr, M.H. Effect of feed canal height on the efficiency of membrane clarification of pomegranate juice, *Journal of Food Processing and Preservation*. 2015. Vol. 39, pp. 881–886. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.12299>
24. Herbiga, A.- L., Delchierb, N., Striegelb, L., Rychlikb, M., Renarda C. Stability of 5-methyltetrahydrofolate in fortified apple and carrot purees. *LWT – Food Science and Technology*. 2019. Vol. 107, pp. 158–163. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.010>
25. Hacı, A.G., Pelin, O.B., Ufuk, B. Clarification of Apple Juice Using Polymeric Ultrafiltration Membranes: a Comparative Evaluation of Membrane Fouling and Juice Quality, *Food and bioprocess technology*. 2017. Vol. 10, pp. 875–885. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1871-x>

Стаття надійшла до редакції 26.03.2025

Г. В. Дейниченко¹, Д. В. Дмитревський^{1, 2}, Д. О. Гончар¹, В. М. Червоний³, Д. В. Горелков³

¹Державний біотехнологічний університет (м. Харків)

²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

³Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ МЕМБРАННОЇ ОБРОБКИ СОКІВ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Анотація

Представлено результати аналізу сучасних методів мембранної обробки рідких харчових продуктів. Проведено огляд обладнання, що використовується для освітлення та концентрування соків. Розглянуто основні технології обробки, зокрема етапи отримання освітленого соку із застосуванням наявних методів і технічних рішень.

Обґрунтовано доцільність використання мембранних технологій для переробки плодово-ягідних соків. Визначено перспективні напрями вдосконалення процесів концентрування й освітлення, а також необхід-



ність розроблення спеціалізованого обладнання для їх реалізації. Досліджено особливості мікрофільтраційної та ультрафільтраційної мембранної обробки соків, включаючи аналіз роботи мембран у тупиковому та тангенціальному режимах.

Виявлено основні переваги й обмеження цих методів у контексті переробки рідких харчових середовищ, а також чинники, що ускладнюють широке застосування мембранних технологій у соковій промисловості. Запропоновано використання мікрофільтраційних і ультрафільтраційних мембранних установок для обробки соку.

Тангенціальна фільтрація може застосовуватися як для мікрофільтрації, так і для ультрафільтрації фруктових соків. Вона забезпечує високу прозорість і мікробіологічну стабільність продукту без використання допоміжних речовин та добавок, що усуває проблеми з їх утилізацією. Мембрани за правильної експлуатації та регулярного обслуговування мають довший термін служби порівняно з традиційною тупиковою фільтрацією.

Застосування тангенціальних фільтрів сприяє збереженню структури й органолептичних властивостей соку, а також забезпечує самоочищення мембран без потреби у дорогих витратних матеріалах. Упровадження мембранних технологій у процес обробки дає змогу збільшити вихід продукту, зберегти його харчову та біологічну цінність, а також покращити якість кінцевого продукту.

Ключові слова: мембранна обробка, соки, плодово-ягідна сировина, ультрафільтрація, мікрофільтрація.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-19>

УДК 637.134

О. О. Ковальов, канд. техн. наук, ст. викладач

К. О. Самойчук, докт. техн. наук, професор

Б. В. Болтянський, канд. техн. наук, доцент

В. Б. Гулевський, канд. техн. наук, доцент

І. С. Панов, здобувач вищої освіти ОС «Бакалавр»

ORCID: 0000-0002-4974-5201

ORCID: 0000-0002-3423-3510

ORCID: 0000-0003-2072-4025

ORCID: 0000-0003-1434-9724

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*e-mail: oleksandr_kovalov@tsatu.edu.ua

УПРОВАДЖЕННЯ КУЛЬТУРИ СОРТУВАННЯ СМІТТЯ В УКРАЇНІ: ПРОБЛЕМИ ТА ПОЗИТИВНИЙ ДОСВІД РОЗВИНЕНИХ КРАЇН

Анотація. Щороку в Україні накопичується величезна кількість сміття, рівень переробки якого не перевищує 5%. Значна частина проблем, пов'язаних з утилізацією сміття, пов'язана з відсутністю його сортування для подальшого рециклінгу. У статті проведено аналіз труднощів, пов'язаних з упровадженням системи сортування сміття. Розглядаються основні методи впровадження культури сортування сміття в розвинених країнах, їх ефективність та проблеми, що виникають. Підкреслено важливість законодавчої підтримки підприємств із рециклінгу, упровадження нормативів відносно відсотку продукції, виготовленої з використанням перероблених матеріалів, регулювання суперечок між обов'язками з утилізації сміття з боку комунальних установ та підприємств. Особливу увагу приділено позитивному досвіду та інноваціям, які можуть бути запозичені з інших країн. Підкреслено важливість громадської свідомості, освітніх програм та державних ініціатив. Розглянуто конкретні приклади з Японії, Німеччини, Швеції та інших країн. Висвітлено можливість адаптації успішних методів для України та інших країн, що розвиваються.

Ключові слова: культура, сортування сміття, проблеми впровадження, позитивний досвід, розвинені країни, громадська свідомість.

Постановка проблеми. Зростаюча чисельність населення світу загострює проблему переробки відходів різного походження. Орієнтовні розрахунки свідчать, що середньостатистичний громадянин за рік продукує 400–500 кг сміття [1]. Значну частину цих відходів становлять тара та упаковка від продуктів харчування або непридатні до споживання харчові відходи (очищені шкірки овочів та фруктів, залишки їжі із завершеним терміном придатності та ін.) [2]. Низька енергоефективність багатьох виробництв, застаріла матеріальна база, низький платоспроможний попит населення зумовлюють те, що виробники майже не приділяють уваги пошуку раціональних рішень щодо перероблюваної тари й упаковки для харчових продуктів. Необхідні компенсаторні та регуляторні механізми з боку держави, що стимулювали би виробників до приділення уваги питанням максимальної безпечності та придатності до переробки тари та упаковки зі збереженням конкурентоздатності (без суттєвого збільшення витрат виробництва або залучення механізму заохочуючої компенсації). Також ситуація відносно участі виробників у процесі утилізації відходів виробництва є недостатньо підтриманою відповідною законодавчою базою. Це спричинює конфлікт між інтересами комунальних установ, яким вигідно переробляти деякі види сміття, та виробниками, у зоні відповідальності котрих має знаходитись організація утилізації тари та упаковки після споживання [1; 3].

Частина відходів узагалі важко піддається сортуванню без проведення додаткових досліджень (різні види пластику, із яких два в принципі непридатні до вторинної переробки) [2; 4]. Означена ситуація стосується не лише пластику, деякі види сміття взагалі не переробляються в Україні.

Аналіз останніх досліджень. Таким чином, виникає критична ситуація, за якої значна частина відходів залишається на звалищах у несортованому вигляді, просто гниє та зброджується, виділяючи в навколишнє середовище дуже велику кількість метану. А цей вуглеводневий газ, своєю чергою, здійснює шкідливий вплив на озоновий шар у 7–21 раз більший порівняно з CO₂ [2]. Переробці в результаті піддається дуже незначний відсоток відходів, величина якого не перевищує 5–7% [1; 3].

Водночас природне розкладання деяких продуктів із виділенням до атмосфери та ґрунту шкідливих компонентів становить десятки та сотні років. Унаслідок цього за рахунок включення до ґрунту та споживання місцевим біоценозом, із подальшим кругообігом, за підрахунками вчених, людина щотижня споживає близько 5 г мікропластику [5]. У подальшому, звісно, це провокує розвиток різних розладів та захворювань, збільшення кількості яких фіксується рік від року. Іншою проблемою є утилізація після використання продуктів спеціального призначення, наприклад акумуляторів, батарейок, люмінесцентних ламп, відпрацьованого мастила, розчинників та фарб. Незважаючи на позитивні зрушення у цьому напрямі, до прикладу організацію збору батарейок у мережі супермаркетів АТБ, проблема все ще знаходиться на досить високому рівні завдяки низькому рівню інформованості, свідомості та мотивації у населення.

У пошуку рішень наочним та економічно доцільним є стимулювання з боку держави широкого впровадження в приватному секторі біогазових установок, які дадуть змогу знизити кількість органічного сміття, що накопичується на звалищах, та отримувати газ біологічного походження [2; 6]. Це здешевить системи опалення, забезпечення електрикою домогосподарств, вартість пального для автомобілів. Іншим шляхом може бути проведення семінарів та тренінгів для підвищення рівня обізнаності населення щодо способів утилізації органічного сміття в умовах приватного сектору, наприклад компостування [1]. Але ці та інші заходи без широкого впровадження культури сортування сміття для збільшення відсотку його переробки та зниження шкідливого впливу на навколишнє середовище і власне здоров'я не мають суттєвого ефекту [5].

Формулювання мети статті. Метою статті є аналіз проблематики впровадження культури сортування сміття. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- проводився аналіз труднощів, пов'язаних з упровадженням системи сортування сміття;
- розглянуто інноваційні рішення та способи заохочення населення до сортування сміття в розвинених країнах із високим рівнем його переробки;
- надано рекомендації щодо реалізації комплексного підходу до проблеми сортування сміття.

Основна частина. У сучасному світі проблема управління твердими побутовими відходами (ТПВ) набуває все більшої актуальності. Культура сортування сміття є ключовим елементом у системі управління відходами, що сприяє зменшенню обсягів відходів та поліпшенню якості вторинної сировини. Основними проблемами впровадження культури сортування сміття є відсутність інфраструктури для сортування та переробки відходів, низький рівень громадської свідомості та високі витрати на впровадження та підтримку систем сортування.

Попри всі зусилля та позитивний досвід існують значні виклики, з якими стикаються країни під час упровадження ефективних методів сортування сміття [1; 5; 7]:

1. Відсутність інфраструктури. Багато країн, особливо ті, що розвиваються, не мають достатньої інфраструктури для збирання, сортування та переробки відходів. Це ускладнює процес сортування та переробки сміття.

2. Низький рівень обізнаності населення. Громадська свідомість є важливим чинником у системі управління відходами. Часто населення не знає про важливість сортування сміття або не має доступу до необхідних ресурсів для цього.

3. Економічні бар'єри. Упровадження систем сортування сміття може вимагати значних фінансових ресурсів, що особливо складно для країн з обмеженим бюджетом.



4. Культурні бар'єри. Існує стійке негативне ставлення до змін у поводженні з відходами, що може гальмувати впровадження нових методів.

5. Логістичні проблеми. Наприклад, єдине місто в Україні, де переробляють тетрапаки, розташоване в Харкові. Забезпечення збору та розділення на окремі компоненти використаних тетрапаків із території всієї країни і в мирний час становило відомі труднощі, тепер же це просто неможливо.

Розглянемо позитивний досвід розвинених країн [5; 8].

У Японії існує дуже детальна система сортування відходів, підтримувана на державному рівні. Громадяни зобов'язані сортувати відходи за різними категоріями, і за порушення правил передбачено штрафи.

Німеччина є лідером у сфері переробки відходів, де понад 65% відходів підлягають переробці завдяки законодавству та розвиненій інфраструктурі.

Швеція має успішну систему управління відходами, де велика частина ТПВ переробляється або використовується для виробництва енергії. Використання автоматизованих систем сортування дає змогу значно підвищити ефективність процесу.

Інноваційні підходи [2; 5]:

1. Смарт-контейнери для сміття. Використання смарт-контейнерів, обладнаних сенсорами, які повідомляють про заповнення та допомагають оптимізувати процес збирання відходів.

2. Екологічно чистий дизайн упаковки. Розроблення пакувальних матеріалів з урахуванням їх подальшої утилізації та переробки. Наприклад, використання однорідних матеріалів, які легко розділяти та переробляти.

3. Розширена відповідальність виробників. Запровадження законів, які зобов'язують виробників нести відповідальність за утилізацію своєї продукції після використання. Це стимулює виробників розробляти більш екологічно чисті пакувальні рішення.

4. Використання мобільних додатків. Розроблення мобільних додатків для інформування населення про правила сортування сміття та розташування пунктів прийому вторинної сировини.

5. Упровадження податкових пільг для компаній які здійснюють рециклінг та накладання стягнень на підприємства, що здійснюють захоронення відходів.

6. Заборона виробництва продуктів, які упаковуються в тару та упаковку, що непридатні до вторинної переробки.

7. Розроблення та впровадження нормативів, які зобов'язують підприємства використовувати певний відсоток вторинної сировини.

Розглянемо країни, що мають високий рівень переробки відходів та методи, за рахунок упровадження яких отримано такі результати [3; 5; 8].

1. Німеччина

– **Рівень переробки:** 67%.

– **Ключові чинники успіху:**

о Система **Grüner Punkt** (Зелена Точка), яка зобов'язує виробників оплачувати збір і переробку своєї упаковки.

о Чітка система роздільного збору сміття: окремі контейнери для паперу, скла, органіки, пластику та залишкових відходів.

2. Швеція

– **Рівень переробки та енергетичного використання:** понад 99% відходів.

– **Особливості:**

о Лише 1% сміття потрапляє на полігони.

о Відходи, що не підлягають переробці, використовуються для виробництва енергії.



- о Екологічна свідомість населення формується через освітні програми та податкові стимули.

3. Японія

- **Рівень переробки:** 84%.

- **Ключові особливості:**

- о Система суворого сортування сміття з детальними інструкціями, які враховують до 45 категорій відходів.

- о Сучасні технології переробки, що дають змогу мінімізувати кількість сміття на полігонах.

4. Південна Корея

- **Рівень переробки:** 53% (органіка – 95%).

- **Чинники успіху:**

- о Система **Pay-as-you-throw**: громадяни оплачують збір сміття залежно від його обсягу та типу.

- о Широкий збір органічних відходів для виробництва біогазу та компосту.

5. Австрія

- **Рівень переробки:** 58%.

- **Особливості:**

- о Державні програми з обов'язкового сортування сміття.

- о Стабільно працююча інфраструктура збору та переробки.

6. Канада (провінція Онтаріо)

- **Рівень переробки:** 50–60%.

- **Ключові чинники:**

- о Розширена відповідальність виробників (EPR) щодо утилізації упаковки.

- о Освітні кампанії та доступна інфраструктура для роздільного збору сміття.

7. Нідерланди

- **Рівень переробки:** 55%.

- **Особливості:**

- о Чітке розділення відходів на органічні, пластик, скло, папір.

- о Потужна мережа переробних заводів.

- о Підтримка громадськими організаціями та активними освітніми кампаніями.

Досвід розвинених країн може стати прикладом для інших країн у цій сфері. Одним із найбільш ефективних методів є освітні програми, які включають навчання дітей правильному сортуванню сміття. У Японії такі програми починаються з раннього віку, що формує свідомість та відповідальність у громадян.

Державні ініціативи також відіграють важливу роль. У багатьох розвинених країнах, таких як Німеччина, держава підтримує програми сортування сміття шляхом законодавчих ініціатив та фінансової підтримки. Законодавство зобов'язує громадян сортувати відходи, а невиконання цих обов'язків може призвести до штрафів.

Технологічні інновації роблять процес сортування більш ефективним. У Швеції використовуються автоматизовані системи сортування, які підвищують ефективність цього процесу. Для успішного впровадження культури сортування сміття необхідний комплексний підхід, що включає освітні, економічні, технологічні та інфраструктурні заходи. Основні кроки для досягнення цієї мети:

1. **Розвиток інфраструктури:** забезпечення зручного доступу до контейнерів для сортування та створення сучасних переробних заводів.

2. **Освітні програми:** формування екологічної свідомості населення через кампанії, навчальні програми у школах та громадські ініціативи.



3. **Економічні стимули:** запровадження систем винагороди для громадян і бізнесів, які активно сортують та переробляють сміття.

4. **Технологічна інтеграція:** використання інноваційних рішень для оптимізації збору та переробки відходів.

5. **Використання світового досвіду:** адаптація найкращих практик розвинених країн, таких як Німеччина, Швеція чи Японія, до місцевих умов.

Поєднання цих дій дасть змогу не лише знизити рівень забруднення навколишнього середовища, а й створити ефективну систему управління відходами, що стане важливим кроком до сталого розвитку суспільства. Пандемія COVID-19 внесла свої корективи в систему управління відходами. Збільшення використання одноразових засобів захисту, таких як маски та рукавички, призвело до зростання обсягів відходів. Це вимагає впровадження нових методів утилізації таких відходів та підвищення ефективності існуючих систем.

Висновки. Громадська свідомість та освіта є ключовими чинниками у формуванні культури сортування сміття. Важливо впроваджувати освітні програми у школах, університетах та на рівні громадських організацій, щоб формувати відповідальне ставлення до відходів із раннього віку. Використання соціальних медіа та громадських акцій допомагає у поширенні інформації та залученні широких верств населення до процесу сортування сміття.

Список використаних джерел

1. Ковальов О.О., Самойчук К.О. Необхідні умови забезпечення конкурентоздатності України на світових ринках продуктів харчування. *Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції «Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії»*, 3–4 листопада 2022 р. Черкаси : ФОП Гордієнко Є.І., 2022. С. 143–146.
2. Інноваційні технології та обладнання галузі. *Переробка продукції тваринництва* : посібник-практикум / К.О. Самойчук та ін. Мелітополь : Forward press, 2020. 250 с.
3. E.S. Gruber, V. Stadlbauer, V. Pichler, K. Resch-Fauster, A. Todorovic, T. C. Meisel, S. Trawoeger, O. Hollóczki, S.D. Turner, W. Wadsak, A. Dick Vethaak, L. Kennercorresponding. To Waste or Not to Waste: Questioning Potential Health Risks of Micro- and Nanoplastics with a Focus on Their Ingestion and Potential Carcinogenicity. *Expo Health*. 2022. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9971145/>
4. Palianychka N., Verkholtantseva V., Kovalyov A. Use of energy-efficient equipment in drinking milk technological line. *Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 24–25 листопада 2022 р. Харків : ДБТУ, 2022. С. 90–92
5. UNEP Food Waste Index Report 2021. URL: <https://www.unep.org/resources/report/unep-food-waste-index-report-2021>
6. Основи розрахунку та конструювання обладнання переробних і харчових виробництв : підручник / К.О. Самойчук та ін. Мелітополь : ММД, 2020. 428 с.
7. Palianychka N., Samoichuk K., Kovalyov A. Application of computer simulation for researching the process of milk emulsion dispersion. *Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії* : матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції, 3–4 листопада 2022 р. Черкаси : ЧДТУ, 2022. С. 110–115.
8. Vitenko, T., Marynenko, N., Kramar, I. European Experience in Waste Management. *Environ. Sci.Proc.* 2021, 9, 17. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2021009017>

Стаття надійшла до редакції 06.04.2025



A. Kovalyov, K. Samoichuk, B. Boltyansky, V. Hulevskyi, I. Panov

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

IMPLEMENTATION OF A WASTE SORTING CULTURE IN UKRAINE: PROBLEMS AND POSITIVE EXPERIENCE OF DEVELOPED COUNTRIES

Summary

The increase in the world's population exacerbates the problem of finding solutions for waste disposal. In Ukraine, the percentage of waste recycling does not exceed 5%. To a large extent, this is due to unresolved problems in the field of waste sorting. On the other hand, there is an unresolved legislative dilemma regarding the responsibilities of enterprises and municipal institutions in organizing waste sorting and disposal. A minor effect can be provided by solutions to support the development of biogas plants, which will reduce the amount of organic waste, and therefore the release of harmful methane into the atmosphere. But the problem of waste that accumulates in landfills from year to year without processing, which ensures the inclusion of harmful components in the body of other animals and the circulation with subsequent entry into the human body, remains.

The article examines the reasons for the low level of waste sorting and recycling in Ukraine. The main ones include the lack of infrastructure, low awareness of the population, the presence of logistical problems in the recycling of certain types of containers and packaging, economic barriers, etc. Innovative solutions and positive experience of developed countries with a high level of household waste recycling are considered, which are based on an integrated approach to solving the problem. However, along with methods such as forcing manufacturers to use a certain percentage of recycled materials, it is necessary to provide legislative incentives for such enterprises. This is necessary for the profitability of production, and therefore the functioning of the enterprise.

Innovative approaches to the problem of waste sorting are considered, including the introduction of smart garbage containers, a ban on the production of products from materials that are not suitable for recycling, the use of mobile applications to notify the population of the nearest location of secondary packaging collection points, and the introduction of benefits for recycling companies. However, without extensive state intervention to ensure educational, legislative, regulatory, stimulating and supporting functions, positive experience will remain only the experience of other countries.

Keywords: culture, waste sorting, implementation problems, positive experience, developed countries, public awareness.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-20>

УДК 631.3:620.9

О. С. Ковязін, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3027-872X

І. О. Чижиков, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3022-4828

О. О. Дереза, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2652-9853

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ ТВАРИННИЦТВА

Анотація. У статті проаналізовано шляхи підвищення енергоефективності у виробництві продукції тваринництва. Основну увагу приділено зниженню енергетичних витрат як важливому чиннику оптимізації собівартості та підвищення рентабельності. Визначено, що ключову роль відіграють удосконалення мікроклімату, використання енергоощадних технологій, автоматизація виробничих процесів та оптимізація кормової бази. Застосування теплоізоляційних матеріалів, альтернативних джерел енергії та систем контролю енергоспоживання сприяє ефективному використанню ресурсів. Упровадження сучасних технологій дає змогу зменшити операційні витрати, підвищити продуктивність та забезпечити фінансову стабільність підприємств.

Ключові слова: тваринництво, автоматизація, мікроклімат, вентиляція, терморегуляція, енергоспоживання, відновлювані джерела, собівартість.

Постановка проблеми. Агропромислове виробництво є невід'ємним складником національної та глобальної економіки як у розвинених країнах, так і в тих, що розвиваються, відіграючи ключову роль у забезпеченні продовольчої безпеки [1], соціально-економічному розвитку сільських територій [2] та підтриманні макроекономічної стабільності [3].

Тваринництво – одна з найважливіших галузей агропромислового виробництва, рівень розвитку якої значною мірою визначає продовольчу безпеку держави, якість харчування населення та його здоров'я [4; 5]. Відповідно до даних Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO), частка тваринництва у глобальному валовому випуску сільськогосподарської продукції становить близько 40% [6]. Окрім того, понад мільярд осіб у світі залежать від цього сектору як від основного джерела економічної діяльності та засобу існування [7].

Тому дослідження ефективних шляхів підвищення енергоефективності у тваринництві є важливим науковим і практичним завданням, що сприятиме покращенню економічної стабільності галузі, підвищенню конкурентоспроможності підприємств і забезпеченню сталого розвитку агропромислового комплексу.

Аналіз останніх досліджень. Останні наукові роботи присвячені пошуку шляхів підвищення енергоефективності у тваринництві як одного з ключових чинників зниження собівартості виробництва. Дослідження [8; 9] аналізують основні складники витрат у собівартості продукції тваринництва.

Одним із напрямів оптимізації є вдосконалення кормової бази. Дослідження [10] доводять, що використання ферментних добавок та контрольованих систем годування сприяє ефективнішому засвоєнню кормів, знижуючи їх перевитрати.

Інший ключовий аспект – підвищення енергоефективності через упровадження сучасних технологій. Дослідження [11] підтверджують ефективність використання альтернативних джерел енергії (біогазові установки, сонячні панелі, геотермальна енергія).

Значна увага приділяється автоматизації виробничих процесів, зокрема використанню роботизованого доїння, автоматизованих систем годування та утилізації відходів [12].

Окремі дослідження [13–17] показують, що до 90% загального енергоспоживання у тваринницьких господарствах припадає на підтримку мікроклімату (терморегуляцію повітря та вентиляцію).

Таким чином, останні дослідження підтверджують, що комплексний підхід до підвищення енергоефективності у виробництві продукції тваринництва, зокрема через модернізацію енергоспоживання, оптимізацію кормової бази та автоматизацію процесів, є ключовим чинником зниження собівартості та підвищення конкурентоспроможності підприємств.

Формулювання мети статті. Метою статті є аналіз шляхів підвищення енергоефективності у виробництві продукції тваринництва та розроблення рекомендацій щодо оптимізації витрат через упровадження сучасних технологій.

Основна частина. У роботах [8; 9] досліджуються числові значення основних складників структури витрат у собівартості продукції тваринництва (рис. 1).

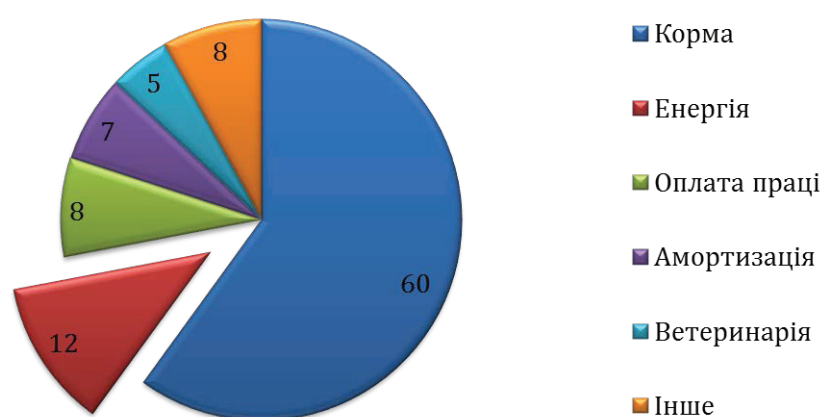


Рис. 1. Структура витрат у собівартості продукції тваринництва

Очевидно, що співвідношення наведених на рис. 1 параметрів варіюватиметься залежно від спеціалізації підприємств, рівня технологічної автоматизації, масштабів виробництва та застосовуваних стратегій ресурсозбереження. Наприклад, у молочному тваринництві частка витрат на корми та ветеринарне обслуговування зазвичай є вищою порівняно з відгодівельними господарствами, де ключову роль відіграють енерговитрати та логістика. Водночас у сучасних інтенсивних виробничих системах інвестиції у підвищення енергоефективності та оптимізацію трудових ресурсів можуть істотно впливати на кінцеву собівартість продукції, сприяючи зменшенню залежності підприємства від коливань цін на зовнішні чинники виробництва.

Ефективне управління виробничими витратами є ключовим чинником підвищення рентабельності та конкурентоспроможності підприємства. Комплексний підхід до зниження собівартості передбачає оптимізацію основних складників затратної структури, зокрема кормової бази, енергоспоживання, трудових ресурсів, ветеринарного обслуговування, амортизаційних витрат, логістики та управління відходами.

Оптимізація кормової бази є ключовим чинником зниження витрат у тваринництві. Вирощування частини кормів на власних угіддях дає змогу зменшити залежність від ринкових коливань цін. Використання ферментних добавок і коригування раціонів сприяє кращому засвоєнню кормів, що підвищує ефективність їх використання [10]. Контрольовані системи годування допомагають мінімізувати втрати під час зберігання та роздачі кормів, що знижує загальні витрати господарства.



Зменшення енергетичних витрат є вагомим чинником зниження собівартості, особливо у виробничих системах із високим рівнем автоматизації. Для цього необхідно переходити на енергоефективні технології, зокрема LED-освітлення та енергоощадне обладнання. Використання відновлюваних джерел енергії, зокрема біогазових установок, сонячних панелей та геотермальної енергії, дає змогу суттєво зменшити залежність від традиційних енергоресурсів [11]. Додатково важливим кроком є впровадження автоматизованих систем контролю енергоспоживання, що підвищує ефективність виробництва та зменшує непотрібні витрати.

Оптимізація трудових ресурсів включає впровадження автоматизованих систем управління процесами, таких як роботизоване доїння, автоматизоване годування та утилізація відходів, що сприяє зменшенню ручної праці та підвищенню ефективності [12]. Раціональне планування робочого часу та оптимізація операційних процесів дають змогу підвищити продуктивність праці, мінімізувати простой та забезпечити більш ефективний розподіл ресурсів.

Контроль витрат на **ветеринарне обслуговування** передбачає зменшення потреби у медикаментах завдяки профілактичним заходам і вдосконаленню методів діагностики. Важливу роль відіграє використання стійких до захворювань порід, а також підвищення рівня біобезпеки господарств, що сприяє зниженню ризику інфекцій та скороченню витрат на лікування [18].

Оптимізація **амортизаційних витрат** і ефективне управління обладнанням передбачає регулярне технічне обслуговування та застосування енергоефективного устаткування. Впровадження модульних технологій сприяє зниженню капітальних витрат під час розширення виробництва, що дає змогу гнучко адаптуватися до змін ринкового попиту [19].

Логістика та управління відходами реалізуються через оптимізацію маршрутів доставки кормів і готової продукції, що допомагає знизити транспортні витрати. Додатково впроваджується використання біогазових установок для ефективної утилізації відходів, що дає змогу отримувати вторинну енергію та екологічно чисті добрива [20].

Таким чином, системний підхід до зниження собівартості виробництва, що включає оптимізацію кормової бази, підвищення енергоефективності, автоматизацію виробничих процесів, ефективне управління трудовими ресурсами та ветеринарним обслуговуванням, є необхідною умовою забезпечення стійкості та конкурентоспроможності підприємств у сучасних економічних умовах. Впровадження інноваційних технологій дає змогу мінімізувати виробничі витрати, покращити продуктивність та адаптувати господарства до змін ринкового середовища.

Енергетичні витрати, незважаючи на відносно невелику частку в загальній структурі собівартості (12%), мають значний потенціал до оптимізації, що може забезпечити суттєве зниження загальних виробничих витрат. На відміну від кормів, частка яких становить 60%, енергоспоживання може бути більш ефективно скорочене завдяки впровадженню сучасних енергоефективних технологій. Це дає змогу не лише знизити витрати на електроенергію та паливо, а й підвищити фінансову стабільність підприємства, зменшуючи його залежність від коливань цін на енергоресурси та підвищуючи прогнозованість витрат.

Важливим аспектом є взаємозв'язок між енергетичною ефективністю та раціональним використанням кормової бази. Оптимізація систем вентиляції та мікроклімату в тваринницьких комплексах сприяє підтриманню стабільних умов утримання, що, своєю чергою, знижує стресові чинники для тварин і непродуктивні втрати кормів. Автоматизовані системи контролю мікроклімату дають змогу зменшити витрати енергії на обігрів або охолодження приміщень, одночасно підвищуючи ефективність годівлі. Таким чином, заходи з підвищення енергоефективності не лише безпосередньо скорочують витрати на енергоресурси, а й опосередковано впливають на зменшення витрат на корми, що є критично важливим для загального зниження собівартості виробництва.

Окреме значення має відповідність екологічним стандартам та регуляторним вимогам, що дедалі більше впливають на функціонування підприємств. Скорочення енергоспоживання безпосередньо зменшує викиди CO₂, що не лише покращує екологічний імідж господарства, а й відкриває доступ до фінансових стимулів, таких як державні гранти, програми підтримки енергоощадних технологій та податкові пільги. У цьому контексті дослідження оптимальних методів упровадження енергоефективних рішень у виробничі процеси набуває стратегічного значення для підвищення конкурентоспроможності підприємств у довгостроковій перспективі.

Забезпечення оптимального мікроклімату у тваринницьких приміщеннях є одним з основних складників енерговитрат у сільськогосподарському виробництві [19]. Залежно від типу будівель, технологій утримання тварин і системи вентиляції витрати енергії на підтримку мікроклімату можуть становити від 40% до 90% загального споживання енергії [13; 14]. Зокрема, у свинарниках цей показник варіюється в межах 50–70% [15], у молочних фермах – 30–40% [16], а в птахівничих господарствах він може досягати 60–90% [17].

На основі аналізу даних, наведених у зазначених дослідженнях, та усереднення числових значень складників енерговитрат отримано структуру витрат енергії під час виробництва продукції тваринництва (рис. 2).

Як показано на рис. 2, зосередження уваги на зменшенні енергетичних витрат, пов'язаних із терморегуляцією повітря та вентиляцією у тваринницьких приміщеннях, є найбільш ефективною стратегією скорочення загального енергоспоживання. Це пояснюється тим, що зазначені параметри мають найбільшу питому вагу та разом становлять 73% від загального обсягу енергетичних витрат.

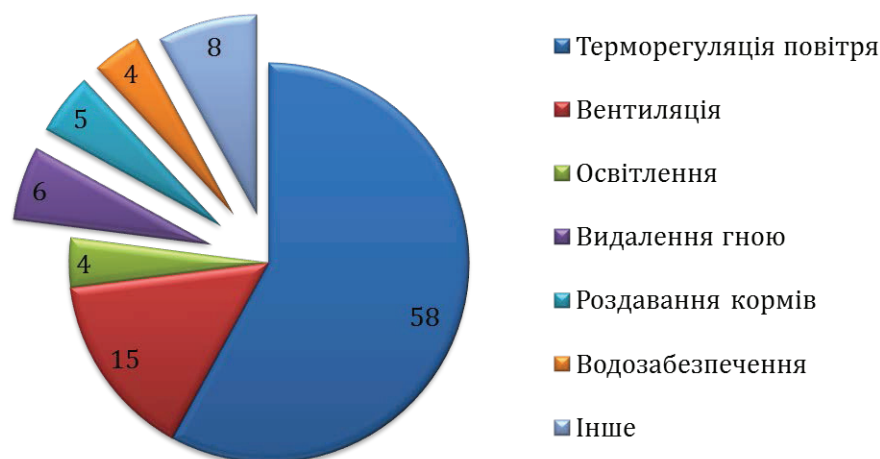


Рис. 2. Структура витрат енергії під час виробництва продукції тваринництва

Для мінімізації енергетичних витрат на терморегуляцію повітря доцільно застосовувати сучасні теплоізоляційні матеріали для підвищення енергоефективності будівель [21], використовувати локальний обігрів інфрачервоними панелями [22], а також інтегрувати альтернативні джерела енергії [23].

Оптимізація вентиляційних процесів можлива завдяки застосуванню автоматизованих систем управління повітрообміном [24]. Додатково, упровадження технологій рекуперації тепла сприяє поверненню частини енергетичних ресурсів у внутрішнє середовище, що знижує потребу в додатковому тепlopостачанні [25].

Оскільки терморегуляція повітря становить 58% від загального обсягу енергетичних витрат, її оптимізація є ключовим напрямом підвищення енергоефективності. Удосконалення системи терморегуляції сприятиме значному зниженню загального енергоспоживання, оптимізації

витрат на утримання тваринницьких приміщень та підвищенню продуктивності тварин. Зосередження уваги на цьому аспекті є стратегічно обґрунтованим рішенням, оскільки саме він має найбільший потенціал для досягнення максимального енергозбереження.

Висновки. Енергетичні витрати хоча й становлять лише 12% собівартості, мають значний потенціал для оптимізації, що сприяє зниженню загальних виробничих витрат. Покращення систем вентиляції та мікроклімату не лише скорочує споживання енергоресурсів, а й створює стабільні умови утримання тварин, знижуючи стресові чинники та втрати кормів. Це комплексно впливає на зменшення собівартості виробництва та підвищення його ефективності.

Зменшення енергетичних витрат на вентиляцію та терморегуляцію повітря є найефективнішою стратегією скорочення загального енергоспоживання, оскільки ці процеси разом становлять 73% від його загального обсягу. Зокрема, терморегуляція становить 58%, що робить її оптимізацію пріоритетним напрямом підвищення енергоефективності. Удосконалення системи терморегуляції сприятиме суттєвому зниженню витрат на утримання тваринницьких приміщень, покращенню мікроклімату та підвищенню продуктивності тварин, забезпечуючи максимальне енергозбереження.

Список використаних джерел

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (n.d.). Food safety. URL: <https://www.fao.org/food-safety/en/>
2. Herrero, M., Grace, D., Njuki, J., Johnson, N., Enahoro, D., Silvestri, S., & Rufino, M.C. (2013). The roles of livestock in developing countries. *Animal*, 7(s1), 3–18. <https://doi.org/10.1017/S1751731112001954>
3. Pica-Ciamarra, U. (2005). Livestock policies for poverty alleviation: Theory and practical evidence from Africa, Asia and Latin America. Pro-Poor Livestock Policy Initiative (PPLPI) Working Paper No. 27. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Retrieved from <http://www.fao.org/ag/pplpi.html>
4. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо вдосконалення державного регулювання продовольчої безпеки та розвитку тваринництва» від 30 червня 2023 р. № 3221-IX. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 2023. № 83. Ст. 302. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3221-20>
5. Братішко В.В. (2017). Науково-технічні основи приготування комбікормів гвинтовими грануляторами. Тернопіль : Видавництво «Крок». ISBN 978-617-692-444-9. URL: <https://www.researchgate.net/publication/337250244>
6. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). Livestock: Engine for economic growth and sustainability. Retrieved from <https://www.fao.org/cfs/cfs-hlpe/insights/news-insights/news-detail/livestock-engine-for-economic-growth-and-sustainability/en>
7. World Bank. (2023). Moving towards sustainability: The livestock sector and the World Bank. Retrieved from <https://www.worldbank.org/en/topic/agriculture/brief/moving-towards-sustainability-the-livestock-sector-and-the-world-bank>
8. Hoste, R., & Benus, M. (2023). International comparison of pig production costs 2022: Results of InterPIG. Wageningen Economic Research. <https://doi.org/10.18174/643744>
9. Koutouzidou, G., Ragkos, A., & Melfou, K. (2022). Evolution of the structure and economic management of the dairy cow sector. *Sustainability*, 14(18), 11602. <https://doi.org/10.3390/su141811602>
10. Bratishko, V., Milko, D., Achkevych, O., & Kuzmenko, V. (2020). Results of experimental studies of process of preparation of feed mixtures with their moistening. Proceedings of the 19th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development», Jelgava, Latvia, May 20–22, 2020. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF349>
11. Panwar, N.L., Kaushik, S.C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 1513–1524. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.037>
12. Bach, A., & Cabrera, V. (2017). Robotic milking: Feeding strategies and economic returns. *Journal of Dairy Science*, 100(9), 7720–7728. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11694>



13. Kaletnik, G., Yaropud, V., & Babyn, I. (2024). Development of resource-saving technical and technological support for production and animal husbandry. Primedia eLaunch. ISBN: 979-8-89619-784-3. <https://doi.org/10.46299/979-8-89619-784-3>
14. Venkatesan, S., Lim, J., Ko, H., & Cho, Y. (2022). A machine learning-based model for energy usage peak prediction in smart farms. *Electronics*, 11(218). <https://doi.org/10.3390/electronics11020218>
15. Daurenbayeva, N., Nurlanuly, A., Atymtayeva, L., & Mendes, M. (2023). Survey of applications of machine learning for fault detection, diagnosis and prediction in microclimate control systems. *Energies*, 16(3508). <https://doi.org/10.3390/en16083508>
16. Mylostyvyi, R., Vysokos, M., Timoshenko, V., Muzyka, A., Vtoryi, V., Vtoryi, S., Chernenko, O., Izhboldina, O., Khmeleva, O., & Hoffmann, G. (2020). Features of the formation and monitoring of the microclimate in non-insulated barns: Unresolved issues. *Theoretical and Applied Veterinary Medicine*, 8(2), 73–85. <https://doi.org/10.32819/2020.82011>
17. Olejnik, K., Popiela, E., & Opaliński, S. (2022). Emerging precision management methods in poultry sector. *Agriculture*, 12(718). <https://doi.org/10.3390/agriculture12050718>
18. Guy, S.Z.Y., Thomson, P.C., & Hermes, S. (2012). Selection of pigs for improved coping with health and environmental challenges: Breeding for resistance or tolerance? *Frontiers in Genetics*, 3, 281. <https://doi.org/10.3389/fgene.2012.00281>
19. Komlatsky, V.I., Podoinitsyna, T.A., & Kozub, Y.A. (2020). Technological process intensification trends in livestock. *Journal of Physics: Conference Series*, 1515(2), 022009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/2/022009>
20. Holm-Nielsen, J.B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100(22), 5478–5484. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046>
21. Paris, B., Vadorou, F., Tyris, D., Balafoutis, A.T., Vaiopoulos, K., Kyriakarakos, G., Manolakis, D., & Papadakis, G. (2022). Energy use in the EU livestock sector: A review recommending energy efficiency measures and renewable energy sources adoption. *Applied Sciences*, 12(2142). <https://doi.org/10.3390/app12042142>
22. Spodyniuk, N., Zhelykh, V., & Dzeryn, O. (2018). Combined heating systems of premises for breeding of young pigs and poultry. *FME Transactions*, 46(4), 651–657. <https://doi.org/10.5937/fmet1804651S>
23. Michaelides, E.E. (2012). *Alternative energy sources*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20951-2>
24. Skliar, O., Grigorenko, S., & Boltianska, N. (2021). Technical means for mechanization of technological processes on livestock farms. In *Theory, Practice and Science: Abstracts of V International Scientific and Practical Conference* (pp. 255–257). Tokyo, Japan: European Conference. Retrieved from <https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2021/10/Theory-practice-and-science.pdf#page=256>
25. Trokhaniak, V., Nasieka, Y., Ihnatiev, Ye., Synyavskiy, O., Skliar, O., & Olt, J. (2024). Study of heat exchange processes in the cooling system of a poultry house with side ventilation. *Agronomy Research*, 22(2), 1016–1025. <https://doi.org/10.15159/AR.24.084>

Стаття надійшла до редакції 11.03.2025

O. Koviazin, I. Chyzykhov, O. Dereza

Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

WAYS TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY IN LIVESTOCK PRODUCTION

Summary

The article explores ways to improve energy efficiency in livestock production. Particular attention is given to reducing energy consumption as a key factor in optimizing production costs and increasing profitability. The study identifies that optimizing microclimate systems, implementing energy-saving technologies, automating production processes, and improving feed management are essential components of cost reduction. The analysis highlights that significant energy consumption is associated with ventilation and thermal regulation in livestock facilities. The application of thermal insulation materials, heat recovery technologies, and automated energy consumption control systems contributes to the efficient use of resources and the reduction of operational costs.



The research emphasizes that integrating renewable energy sources, such as biogas plants, solar panels, and geothermal energy, can significantly decrease dependency on traditional energy sources and enhance the economic stability of livestock enterprises. Furthermore, automation in feeding, milking, and waste management reduces labor costs and enhances productivity.

Improving energy efficiency not only lowers production costs but also increases the competitiveness of livestock enterprises. Sustainable energy management and technological advancements contribute to long-term financial stability, reducing the impact of market fluctuations on production costs. Additionally, ensuring compliance with environmental regulations through reduced carbon emissions and sustainable waste management practices provides economic and ecological benefits.

The article concludes that a systematic approach to energy efficiency improvement, incorporating modern energy-saving technologies, automation, and feed optimization, is crucial for reducing production costs and enhancing the sustainability of the livestock sector.

Keywords: livestock, automation, microclimate, ventilation, thermoregulation, energy consumption, renewable sources, cost price.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-21>

УДК 631.364:621.311.243

С. В. Коробка¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-4717-509X

Б. В. Болтянський², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2072-4025

Р. В. Скляр², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1547-5100

І. Г. Стукалець¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7107-4865

Р. Б. Шеремета¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-7331-3118

¹Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: korobkasv@ukr.net

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ СИСТЕМИ «ФОТОМОДУЛЬ – АКУМУЛЯТОР»

Анотація. У роботі здійснено аналіз впливу параметрів зарядно-розрядного процесу на енергетичну ефективність акумуляторів. Порівнюючи навантажувальні характеристики типового фотомодуля із зарядними характеристиками акумулятора, визначено основні причини втрат ефективності у фотоелектричних установках. Отримані закономірності необхідно враховувати під час проєктування структури фотоелектричних установок і розроблення алгоритмів їх функціонування для максимально ефективного використання сонячної енергії.

Ключові слова: фотомодуль, фотоелектрична установка, акумулятор, зарядний струм, зарядна напруга, ефективність, коефіцієнт віддачі, коефіцієнт корисної дії.

Постановка проблеми. Фотомодуль – це компонент фотоелектричної установки, який перетворює сонячну енергію на електричну за допомогою напівпровідникових матеріалів. Фотоелектрична установка складається з одного або кількох фотомодулів та інших компонентів для генерації і накопичення електроенергії. Акумулятор використовується для зберігання електроенергії, отриманої від фотомодулів, і забезпечує живлення у періоди недостатньої сонячної активності.

Зарядний струм – це струм, який подається на акумулятор під час зарядки, а зарядна напруга – це напруга, що підтримується на акумуляторі у цей час.

Ефективність системи визначається як здатність акумулятора зберігати та віддавати електроенергію з мінімальними втратами. Коефіцієнт віддачі показує відсоток енергії, яку акумулятор здатен повернути під час розрядки порівняно з отриманою під час зарядки. Коефіцієнт корисної дії (ККД) визначає загальну ефективність системи, включаючи втрати під час перетворення та зберігання енергії.

Світовий рівень прийняття фотоелектричних установок зріс на 43% у 2020 р., коли було продано понад 3 млн одиниць. За прогнозами Міжнародного енергетичного агентства, до 2030 р. близько 30% усіх фотоелектричних установок будуть приватні домогосподарства автономними. Однак сьогодні фотоелектричні установки становлять лише від 1% до 3% загальної кількості фотомодулів [1; 16]. Досягнення високих показників продажів можливе лише за умови конкурентоспроможності відновлюваних джерел енергії над традиційними джерелами, які нині мають перевагу серед споживачів. Щоб фотоелектричні установки стали привабливими для покупців, необхідно вирішити низку ключових проблем, зокрема щодо їхніх ефективності та інфраструктури.



Фотоелектричні установки можуть стати важливою альтернативою у боротьбі з глобальним потеплінням, забрудненням повітря та виснаженням паливних ресурсів, оскільки вони є екологічно чистими та використовують відновлювані джерела енергії. Акумулятор є основним елементом фотоелектричних установок і його ємність безпосередньо впливає на тривалість автономної і безперебійної роботи об'єкта. Додатковою перевагою фотоелектричних установок є можливість заряджання вночі за допомогою електромережі. Останнім часом такі країни, як США, Індія, Китай та держави Європейського Союзу, активно просувають фотоелектричні установки, запроваджуючи різні програми та стимули, зокрема екологічні й економічні.

Однак через обмежену кількість зарядних станцій багато споживачів бояться короткотривалої безперебійної роботи об'єкта без можливості підзарядки, що створює затримки та викликає занепокоєння. Це явище називають занепокоєнням безперебійної роботи об'єкта – страхом, що батареї фотоелектричних установок не вистачить для довготривалої роботи. Виробники оригінального обладнання активно працюють над збільшенням ємності батареї, що впливає на її розмір, хімічний склад та систему керування. Для споживача, який планує використовувати фотоелектричні установки, важливими критеріями є коротший час заряджання, менше обслуговування та нижча вартість експлуатації [2].

Відбір енергії з фотомодуля та її передача до акумулятора зазвичай здійснюються за допомогою зарядного пристрою. Сучасні зарядні пристрої забезпечують оптимальну генерацію електроенергії шляхом постійного відстеження точки максимальної потужності (P_{mpp}) на вольт-амперній характеристиці (ВАХ) фотомодуля. У складі фотоелектричних установок (ФЕУ) такі пристрої також виконують додаткові функції керування потужністю відповідно до схеми комутації силових елементів. Проте щоб знизити вартість ФЕУ, часто прагнуть заряджати акумулятори до максимальної ємності, не приділяючи належної уваги ефективності проміжних етапів перетворення електроенергії. У результаті без правильного обґрунтування алгоритму зарядно-розрядного процесу непродуктивні втрати можуть нівелювати переваги навіть найсучасніших і високотехнологічних зарядних пристроїв.

Аналіз останніх досліджень. Сучасне суспільство дедалі більше залежить від електронних пристроїв, і акумулятори відіграють ключову роль у нашому повсякденному житті [1]. Системи накопичення енергії, особливо акумулятори, є важливим інструментом для боротьби з наслідками кліматичних змін, викликаних використанням викопних видів палива, і стають невід'ємною частиною енергетичного балансу [2]. Літій-іонні акумулятори (LiBs) сьогодні є основним вибором для багатьох сфер – від портативної електроніки до стаціонарних енергосховищ та електромобілів (EV) [3]. За прогнозами [4], глобальна потужність LiBs зросте з 242 ГВт-год. у 2020 р. до 2731 ГВт-год. до 2030 р., що демонструє 11-кратне збільшення за десятиліття. Приватний сектор є головним споживачем LiBs, на що вказує різке зростання світових продажів для фотоелектричних систем: із 500 тис у 2016 р. до 14 млн у 2023 р. [5]. Прогнозується, що ця тенденція триватиме: до 2040 р. кількість продажів акумуляторів досягне 66 млн [6].

Однією з важливих проблем безперебійних систем фотоелектричних установок є поступове зниження ємності акумулятора, що впливає на його ефективність і тривалість роботи. Акумулятори проєктуються з урахуванням прийнятного терміну служби, і виробники активно працюють над зменшенням швидкості їх деградації. Проте погіршення характеристик акумуляторів залишається неминучим, що вимагає їх заміни для сталого користування [7]. Акумулятори безперебійних систем фотоелектричних установок зазвичай замінюються, коли їхня ємність зменшується на 20–30% від початкової [8; 9; 16–21].

На стійкість безперебійних систем фотоелектричних установок у контексті завершення терміну служби акумулятора впливають кілька чинників. По-перше, вирішення питання тер-



міну служби акумулятора є важливим свідченням екологічної відповідальності виробників. По-друге, процес переробки включає етапи збору, транспортування та відновлення таких основних матеріалів, як літій, кобальт і нікель, свинець. Потреба в заміні старих акумуляторів може стати серйозним викликом для розвитку ринку EV [10]. За прогнозами, між 2011 і 2040 рр. для перепрофілювання буде доступно близько 16,8 млн акумуляторів [11]. Тому ефективне управління акумуляторами, що вийшли з експлуатації, та їх повторне використання можуть бути життєздатними рішеннями для продовження їхнього терміну служби.

У роботі [12] підкреслюють необхідність поєднання зростання продажів безперебійних систем фотоелектричних установок зі сталими практиками, зокрема щодо визначення терміну служби акумулятора. Їхні дослідження наголошують на ризику недостатнього використання акумуляторів, особливо в умовах збільшення їхньої ємності, що може негативно вплинути на загальну стійкість. Раніші дослідження охоплювали технічні характеристики, економічну доцільність та практичне застосування акумуляторів [13]. Автори [14] провели критичну оцінку перспектив і викликів, пов'язаних із цією технологією.

У роботі [17] провели огляд повторного використання акумуляторів для стаціонарного зберігання енергії, підкреслюючи важливість розроблення методологій сортування та моделювання старіння батарей. Незважаючи на дослідження можливостей повторного використання акумуляторів, питання економічної доцільності, відповідності параметрів, безпеки та політики залишаються невирішеними. Цей огляд зосереджується на технічних та соціально-економічних аспектах повторного використання акумуляторів, досліджуючи виклики та потенційні рішення для продовження терміну їх служби в інших застосуваннях.

Тому для більшості користувачів акумулятори асоціюються, головним чином, із запуском двигунів внутрішнього згоряння, де ключовими параметрами є розрядна потужність і кількість можливих повторних запусків без утрати ємності. Це ж стосується й традиційних застосувань, таких як резервні та охоронні системи живлення. Ефективність акумулятора як перетворювача енергії зазвичай не є пріоритетом. За даними довідника [1], середній коефіцієнт корисної дії (ККД) акумуляторів є відносно низьким: свинцево-кислотні мають ККД близько 80%, нікель-кадмієві – 70%, нікель-металогідридні – 65%, а літій-іонні – 75%. Проте ці показники базуються на середніх умовах експлуатації з використанням оптимальних зарядних пристроїв, що працюють від мережі. У випадку фотоелектричних установок (ФЕУ) підтримання рекомендованих умов заряджання можливе лише протягом коротких періодів за стабільного рівня освітленості фотомодуля, що на практиці відбувається рідко.

Пряме вимірювання енергії, накопиченої акумуляторами під час заряджання за складними імпульсними алгоритмами, є технічно складним завданням, а методи його реалізації лише починають розроблятися [2]. Водночас результати таких вимірювань мають переважно теоретичну цінність, оскільки вирішують лише окремі аспекти проблеми.

Ефективність зарядно-розрядного циклу зазвичай оцінюється через коефіцієнти віддачі за ємністю (η_Q) або за енергією (η_W) [3–6]. Необхідні кількісні показники для цих оцінок можна отримати за допомогою простого аналізу режимів зарядно-розрядного процесу, який поки що не отримав достатньої уваги. У разі заряджання від фотомодуля параметри процесу заряджання повністю залежать від характеристик генерації фотоелектричної енергії, для яких потрібно розробити відповідний енергоефективний алгоритм заряджання та оптимальну структуру зарядного пристрою. Важливим етапом цього є уточнення існуючих термінів та методик вимірювання, що становить необхідну частину даного дослідження.

Формулювання мети статті. Метою дослідження є розроблення схем пристроїв фотоелектричних систем для заряджання акумуляторних батарей асиметричним струмом із підвищеним коефіцієнтом корисної дії (ККД), проведення аналізу характеристик моделей цих схем,

а також розроблення алгоритмів для ефективного управління процесом заряджання акумуляторних батарей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити характеристики акумуляторних батарей та методів їх заряджання;
- розробити схеми пристроїв для заряджання акумуляторних батарей асиметричним струмом із підвищеним коефіцієнтом корисної дії (ККД);
- змодельовати та проаналізувати електромагнітні процеси у роботі запропонованих схем;
- розробити алгоритми для ефективного управління процесом заряджання акумуляторних батарей.

Основна частина. Досягнення в технології акумуляторів (рис. 1):

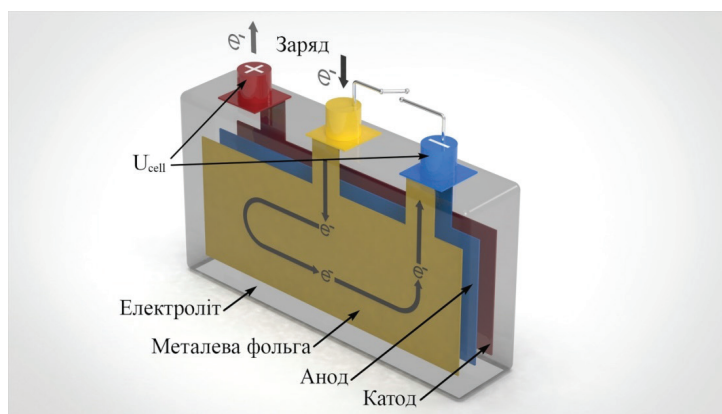


Рис. 1. Загальний вигляд будови акумуляторної батареї

Алюмінієво-іонні акумулятори. Літій-іонні батареї використовуються в електромобілях протягом тривалого часу. Алюмінієво-іонні акумулятори хороші для накопичення енергії, що пов'язано з їхньою гравіметричною та об'ємною ємністю. Алюміній більше, ніж літій. Al-іонні батареї забезпечують у чотири рази більше енергії, ніж літій-іонні батареї за низького рівня вартості. В алюмінієвих іонних акумуляторах алюміній використовується як негативний електрод, а графіт – як позитивний електрод. Іонними прийнято $AlCl_3$ і 1-етил-3-метилімідазолій хлорид рідина. Ця іонна рідина має напівоборотну реакцію для обох електродів:

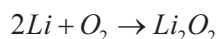
Негативний електрод: $Al + 7 AlCl_4^- = 4 Al_2Cl_7^- + 3e^-$

Позитивний електрод: $C_n(AlCl_4^-) + e^- = C_n + AlCl_4^-$

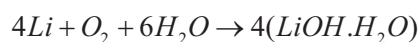
Таким чином, алюмінієво-іонні батареї можуть використовуватися в майбутньому для систем зберігання енергії у фотоелектричних установках [6; 7; 21].

Складні батареї. Компанія Jenax [8] розробила інноваційний літій-іонний акумулятор, який можна скласти до 200 тис разів без утрати його продуктивності. Ці батареї підтримують швидку зарядку та можуть жити невеликі компоненти фотоелектричних установок. Вони вирізняються високою стійкістю до втоми на згин і мають високу щільність енергії. Робочий температурний діапазон складних батарей становить від $-20^\circ C$ до $60^\circ C$, що робить їх придатними для використання в будь-яких кліматичних умовах. Ємність акумулятора дорівнює 30 мАг, і він успішно пройшов тести на безпеку, включаючи водонепроникність [9].

Літій-повітряна батарея. Літій-повітряна батарея (LiO_2B) – це ще одна літєва батарея, яку необхідно детальніше вивчити через її високу здатність виробляти енергію. В осередку анод – металевий літій, катод – пористий вуглець, а використовуваний електроліт є неводним [2]. Теоретично він може виробляти високу питому щільність 3505 Вт·год./кг. Реакція комірки така:

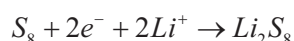


Теоретична щільність енергії неводних літій-повітряних батарей вища, ніж у звичайних свинцево-кислотних акумуляторів. Реакція, що обґрунтовує теоретичну щільність енергії води літій-повітряного акумулятора:



Щільність енергії водних літій-повітряних батарей нижча, ніж у неводних звичайних свинцево-кислотних акумуляторів [5].

Літій-сірчаний акумулятор. Сірка є природним елементом, який широко поширений та недорогий. Вона екологічно безпечна, тому літій-сірчані батареї не становлять загрози для довкілля. Металевий літій використовується як анод, сірчаний композит – як катод, а органічна рідина служить електролітом. Теоретична ємність сірки становить 1675 мАг/г, тоді як для металевого літію вона дорівнює 3860 мАг/г. Літій-сірчані батареї мають питому енергію 2567 Вт·год./кг [2], а процес їх розрядки проходить у два етапи [3].



Вибір матеріалів електродів для швидкої зарядки. Ефективність батареї значною мірою залежить від вибору матеріалів електродів. Літій-іонні акумулятори мають потенціал для швидкої зарядки. У таких батареях графіт використовується як один з електродів, проте для скорочення часу заряджання необхідно підбирати відповідні матеріали. Для досягнення швидкої зарядки та високої щільності енергії у літій-іонних батареях можна використовувати червоний фосфор. Літій біс(фторсульфоніл)імід змішують із розчинниками, такими, як триетилфосфат і фторетиленкарбонат, що мають вогнезахисні властивості, для створення інтерфейсу твердого електроліту. Це підвищує електрохімічні характеристики анода з червоного фосфору [2; 4].

Сонячні панелі. Дослідники запропонували використовувати сонячні панелі для генерування електроенергії для безперебійного джерела живлення об'єкта [5]. Наприклад, модулі сонячних панелей можуть автоматично заряджати акумуляторні блоки, що зменшує занепокоєння користувачів щодо частих зупинок і збільшує запас ходу електромобілів. Використання відновлюваних джерел енергії для виробництва батарей допомагає знизити кількість токсичних відходів, що утворюються через транспортні засоби, роблячи цей підхід екологічно безпечним. Сонячні панелі встановлюються на даху електромобілів, а їх ефективність залежить від кількості сонячного світла, яке вони поглинають. Максимальну потужність панелі забезпечують за температури 25°C. Електроенергія генерується, коли сонячне світло потрапляє на панелі. Інженери продовжують удосконалювати технологію сонячних панелей, щоб підвищити їх ефективність [6].

Інтерфейси твердотільних батарей. Твердотільна батарея (SSB) складається з твердих компонентів, які відіграють ключову роль у передачі електронів і транспорту іонів. Порівняно з літій-іонними батареями, що використовують рідкий електроліт, SSB забезпечує вищу енергетичну щільність. Вони також є безпечнішими за сучасні акумуляторні системи завдяки своїй твердотільній структурі, що робить їх менш ризикованими, негорючими та безпечними від можливого витоку електроліту. У SSB використовується вогнестійкий електроліт. Твердотільні батареї сприяють удосконаленню інших типів акумуляторів, збільшуючи щільність енергії на одиницю площі завдяки меншій кількості необхідних елементів. Вони ідеально підходять для акумуляторних систем електромобілів, і виробники автомобілів активно працюють над удосконаленням цих батарей для підвищення ефективності електротранспорту і використання їх у фотоелектричних установках [7].

Суперконденсатори. Суперконденсатори, також відомі як електричні двошарові конденсатори, є інноваційною технологією для зберігання енергії, яка відрізняється від звичайних аку-

муляторів. Останнім часом вони набули популярності завдяки використанню у фотоелектричних установках і електромобілях. Суперконденсатори мають життєвий цикл, що перевищує пів мільйона циклів, зберігаючи енергію в електростатичному полі [2]. На відміну від акумуляторів їхній життєвий цикл значно довший. Акумулятори також можуть працювати в ширшому температурному діапазоні, від -40°C до 70°C , тоді як акумулятори можуть мати проблеми за низьких температур. Вони також мають нижчий внутрішній опір, що зменшує втрати тепла та підвищує енергоефективність. Завдяки суперконденсаторам можна досягти високої потужності (до 10 кВт/кг) за лічені секунди [8].

Таким чином, у роботі будемо розглядати основні проблеми, з якими стикаються акумулятори, зокрема недостатня інфраструктура для зарядки та питання теплового управління батареями. Також обговорюються можливі рішення для подолання цих викликів. Приділяється увага вдосконаленню технологій акумуляторів із метою підвищення ефективності роботи фотоелектричних установок. Окрім того, розглядаються кілька концепцій, які поки що можуть бути недоступними, але здатні сприяти розвитку майбутніх технологій.

Будь-який енергетичний перетворювач має певний коефіцієнт корисної дії (ККД), який обчислюється як відношення корисної роботи до спожитої енергії. У випадку акумулятора енергія зовнішнього джерела накопичується в електролітичній комірці завдяки зміщенню рівноваги окисно-відновних реакцій і переміщенню реагуючих речовин. Процес зарядки прискорюється за рахунок підвищеної зарядної напруги, що сприяє перемішуванню іонів, але водночас збільшує непродуктивні втрати через підвищення опору електроліту та поляризацію електродів, що проявляється у підвищенні температури. Під час розрядки відбувається зворотний процес із подібними втратами, які посилюються зі збільшенням розрядного струму. Як наслідок, кількість енергії, що виділяється на корисне навантаження, значно менша від вхідної енергії. Тому ККД зарядно-розрядного циклу η_w , або коефіцієнт віддачі енергії, визначають через відношення енергії, що виділяється під час розрядки W_p , до енергії, витраченої на повну зарядку акумулятора W_z .

$$\eta_w = \frac{W_p}{W_z}. \quad (1)$$

Падіння напруги на обох типах опорів залежить від величини розрядного струму I_p або зарядного струму I_z , які для зручності на рис. 2 вважаються однаковими.

На рис. 3 представлено спрощену схему процесу зарядки та розрядки акумулятора, на якій показано падіння напруги на внутрішній частині кола. Опори цієї ділянки можна умовно звести до суми активного опору електроліту для проходження струму R_a та опору поляризації електродів R_n .

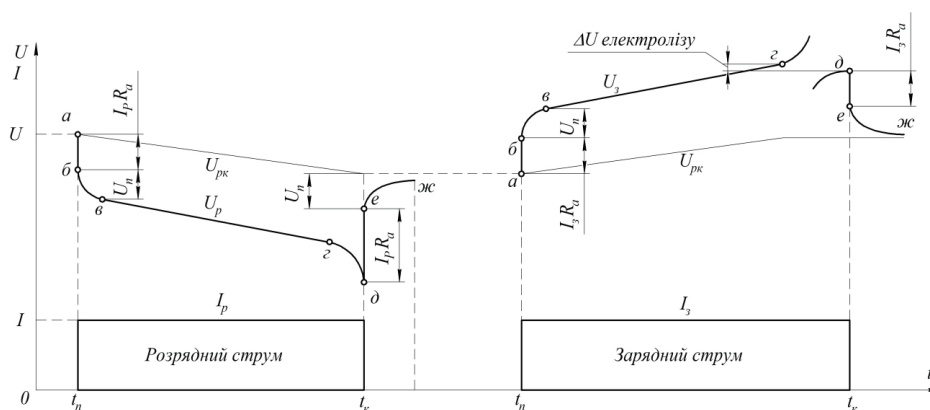


Рис. 2. Схема зарядно-розрядного циклу акумулятора

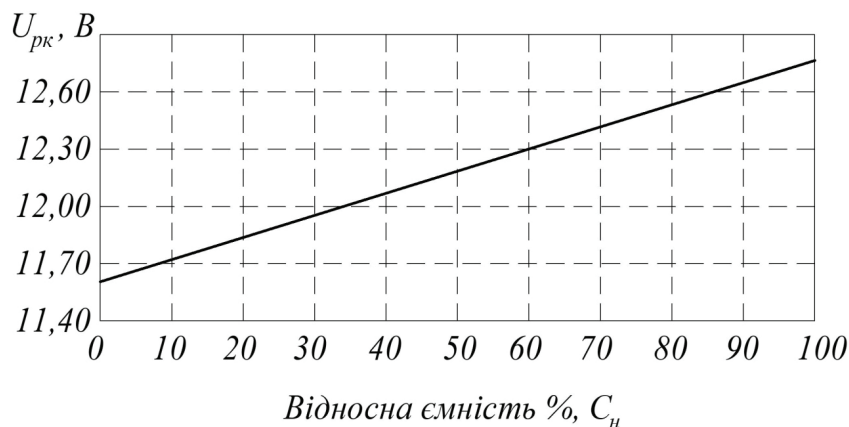


Рис. 3. Залежність напруги розімкненого кола акумулятора від стану зарядженості

Коефіцієнт віддачі по енергії η_w урахує повні втрати енергії зарядно-розрядного циклу, які у загалом розраховують інтегруванням:

$$W_z = \int_0^{\tau_z} I_z(\tau) \cdot U_z(\tau) d\tau; \quad (2)$$

$$W_p = \int_0^{\tau_p} I_p(\tau) \cdot U_p(\tau) d\tau. \quad (3)$$

Значення енергетичного ККД можна оцінити також геометрично за співвідношенням площ під кривими $U_p(t)$ і $U_z(t)$ на початку t_0 і у кінці t_k процесу.

Як показано на схемі (рис. 2), спади напруги на обох типах внутрішніх опор залежать від величини струму. Зменшення струмів дає змогу зменшити різницю між окресленими площами, що, своєю чергою, підвищує ККД зарядно-розрядного циклу. Проте чисельний розрахунок ККД можливий лише за наявності чітких критеріїв для оцінки початкового та кінцевого енергетичного стану акумулятора, який, як і конденсатори, визначається через поняття ємності. Хоча у конденсаторах накопичуються вільні заряди, в акумуляторах – хімічно зв'язані. Додатково, електрохімічні процеси накопичення та вивільнення енергії в акумуляторах відбуваються відносно повільно через дифузійний механізм переміщення іонів. Таким чином, незважаючи на формальну схожість одиниць вимірювання, терміни «ємність» і «заряд» для акумулятора мають дещо інший або умовний фізичний зміст.

Здатність електрохімічної комірки зберігати електрику кількісно характеризується ємністю, яку через повільні процеси прийнято вимірювати в ампер-годинах (А·год.). Фактична (абсолютна) ємність акумулятора залежить від його електрохімічної природи, масогабаритних характеристик конструкції, концентрації електроліту, температури та інших чинників, тому не може мати чіткого метрологічного визначення. У зв'язку із цим у практиці використовується поняття номінальної ємності (C_n) – умовного «заряду» в А·год., який акумулятор може багаторазово вивільняти після повного заряджання. Номінальна ємність акумулятора завжди менша за фактичну, і її значення визначається від мінімально допустимого рівня розряджання (C_{min}), що не загрожує його передчасному виходу з ладу. Зазвичай номінальну ємність установлює виробник на основі результатів 20-годинної розрядки повністю зарядженого акумулятора сталим струмом до мінімально допустимого рівня C_{min} .

Зарядний стан акумулятора зручно виражати у відносних величинах як частку або відсоток номінальної розрядної ємності, що називається ступенем (рівнем) заряду. Існують два напрями відліку: один – за ступенем заряду, інший – за ступенем розрядки. Нульовий ступінь зарядки



(0% C_n) відповідає мінімально допустимій ємності акумулятора, а одиниця (100% C_n) – номінальній ємності. Відлік за ступенем розрядки проводиться в протилежному напрямі. Із часом акумулятор утрачає здатність зберігати енергію, тому його виводять з експлуатації, коли відносна ємність зменшується до 80% C_n .

Розрядні та зарядні струми акумуляторів різних типів і ємностей зручно вимірювати у «природних» одиницях, які чисельно відповідають тривалості розрядки номінальної ємності. Наприклад, акумулятор із номінальною ємністю 60 А·год., розряджаючись 6-амперним струмом протягом 10 годин, позначається як $I_{10} = C/10$ або 0,1С. Якщо ж акумулятор розряджається 3-амперним струмом протягом 20 годин, його позначають, як $I_{20} = C/20$ або 0,05С.

Досвід експлуатації акумуляторів свідчить, що ступінь їх заряду практично пропорційний загальній електрорушійній силі (е. р. с.) усіх електрохімічних комірок. У практичних умовах е. р. с. акумулятора часто прирівнюють до напруги розімкнутого зовнішнього кола (U_{pk}). У довідниковій та спеціалізованій літературі [5; 6] можна знайти графічні або табличні залежності ступеня заряду основних типів акумуляторів від цієї напруги (рис. 2). Однак цю залежність доцільно вважати напівкількісною, ураховуючи певну невизначеність у визначенні номінальної ємності.

Визначити зміну зарядного стану акумуляторів можна відносно легко, провівши пряме вимірювання напруги розімкнутого кола (U_{pk}). Проте через залишкові поляризаційні явища напруга розімкнутого кола наближається до електрорушійної сили (е. р. с.) лише після тривалого переходу електрохімічних комірок від збудженого до рівноважного стану. Тому для негерметичних акумуляторів напругу розімкнутого кола у вольтах можна розрахувати, використовуючи густину електроліту (d) в г/см³ за відповідним співвідношенням:

$$U_{pk} = 0,84 + d \cdot (4)$$

Кінетика зарядно-розрядних процесів і алгоритми зарядки акумулятора. Наведені поряд значення стандартних потенціалів на електродах відносяться до випадку мольної концентрації електроліту. Своїх максимальних значень ($\phi_{PbO_2} = 1,72$ В, $\phi_{Pb} = -0,4$ В) потенціали досягають за 37% концентрації сірчаної кислоти. Відповідно, максимальна е. р. с. стандартного акумулятора не може перевищувати значення:

$$E_{max} = [1,72 - (-0,4)] \cdot 6 = 12,72 \text{ В.}$$

За великих розрядних струмів виникає безліч центрів кристалізації, що призводить до так званої гетерофазної кристалізації та утворення рівномірного і щільного шару сульфату на електродах. Подібне явище спостерігається також за надмірної розрядки: окремі кристали сульфату на поверхні електродів зростаються, а проміжки між ними заповнюються. В обох випадках може статися повна ізоляція електродів, що ускладнює їх відновлення без зовнішнього втручання. У результаті подальшої розрядки в такому режимі зростає внутрішній опір, і напруга падає до мінімально допустимого значення 7,8 В.

На відміну від цього за малих розрядних струмів, коли нові центри кристалізації утворюються рідко, триває ріст уже сформованих кристалів. У цьому разі шар сульфату складається з великих хаотично зрощених кристалів зі значними порожнинами між їхніми гранями. Доступ до електродів зберігається, що дає змогу більш повно використовувати активні реагуючі маси та ємність акумулятора. Проте такий режим розряджання слід зупиняти за зменшення напруги до 10,5–10,8 В [7; 8].

Швидкість заряджання акумуляторів зростає зі збільшенням напруги на їхніх клеммах, однак ефективність цього процесу обмежується поляризаційними явищами. Із підвищенням ступеня зарядки зростає напруга розімкнутого кола (U_{pk}), і для продовження зарядного процесу необхідно підвищувати зарядну напругу. За наближення до номінального зарядного стану до резистивних та поляризаційних утрат додаються ще втрати на газовиділення внаслідок посиленого

електролізу. Як наслідок, зменшується ефективність зарядно-розрядного циклу. Тому виробники акумуляторів зазвичай рекомендують режим заряджання для типових умов експлуатації: циклічного, буферного та аварійного.

Акумулятори фотоенергетичних установок АПК зазвичай функціонують у циклічному режимі, заряджаючись удень і розряджаючись уночі. Однак умови заряджання від фотомодуля рідко відповідають рекомендаціям виробників, які були розроблені для пристроїв, що живляться від електромережі. Енергетичні параметри фотомодуля є випадковими величинами, які не залежать від користувача, і будь-яке відхилення від оптимальної точки навантаження призводить до зниження потенційної продуктивності. Таким чином, зарядні режими акумуляторів фотоелектричних установок слід адаптувати до специфіки генерації фотоелектрики, а не навпаки, як рекомендується за заряджання від електромережі [16–21].

Енергетичною характеристикою глибини зарядно-розрядного циклу є зміна зарядної ΔC (*charge*) та розрядної ΔD (*discharge*) ємності, вимірюваної в А·год. [3; 10]. Відношення розрядної ємності до зарядної називають коефіцієнтом віддачі за ємністю, або ефективністю заряду η_q .

$$\eta_q = \frac{\Delta D}{\Delta C} . \quad (5)$$

Коефіцієнт віддачі за ємністю, передусім, визначається співвідношеннями обох струмів, а також утратами, пов'язаними з електролізом води та саморозрядом. Це вказує на необхідність уникати форсованих режимів і не намагатися заряджати акумулятор до 100% C_n для досягнення енергоощадності. Цей висновок підтверджується графічними залежностями, представленими на рис. 4 і 5, які можна знайти в довідникових та рекламних матеріалах деяких виробників [5; 6].

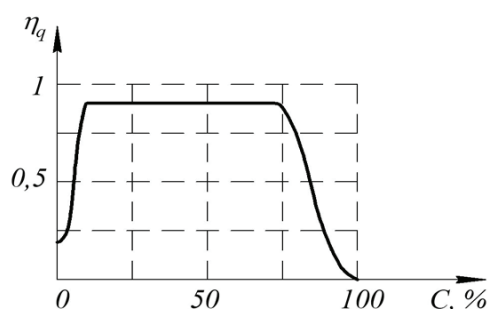


Рис. 4. Схематична залежність зарядної ефективності від стану зарядженості акумулятора

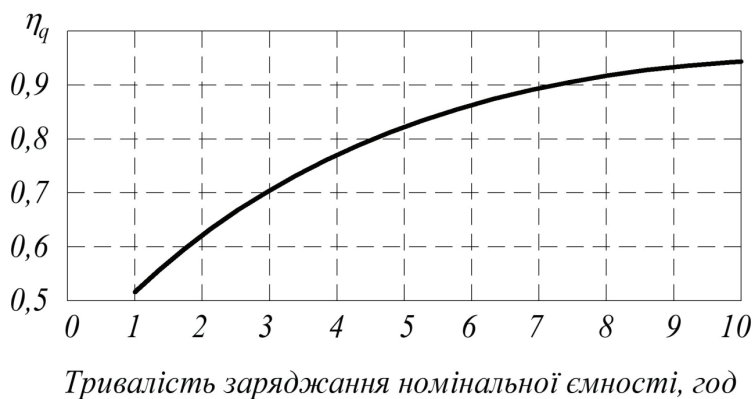


Рис. 5. Залежність ефективності заряд від зарядного струму, вираженого в годинах заряджання номінальної ємності

Використання простого двоступеневого зарядного пристрою дає змогу зменшити втрати на електроліз води шляхом обмеження зарядного струму на рівні 50–60% C_n . Однак це призводить до втрат енергії фотомодуля, які виникають на обмежувальному резисторі. Зарядні пристрої з широтно-імпульсною модуляцією зарядного струму можуть забезпечити коефіцієнт заряду 0,95, навіть за високого ступеня зарядженості. Проте частина потужності фотомодуля, пропорційна шпаруватості зарядних імпульсів, залишається невикористаною. Отже, для мінімізації втрат фотоелектричної енергії під час накопичення рекомендується вибирати акумулятор великої ємності, за якої номінальний струм фотомодуля (I_ϕ) не перевищує 0,1C розрядного струму акумулятора:

$$I_\phi \leq 0,1C. \quad (6)$$

За менших зарядно-розрядних струмів ефективність заряду практично залишається сталою на рівні 0,95.

Із метою продовження терміну служби акумуляторів не рекомендується їх розряджати нижче 30% від номінальної ємності (C_n). Для мінімізації втрат акумулятор варто використовувати в межах 30–80% C_n , що фактично означає використання лише 50% його номінальної ємності. У цьому діапазоні за постійних струмів зарядно-розрядні характеристики змінюються лінійно з часом (рис. 4), тому енергія кожного процесу визначається як добуток середньої напруги на ємність:

$$W_z = \bar{U}_z \cdot I_z \cdot t = \bar{U}_z \cdot C; \quad (7)$$

$$W_p = \bar{U}_p \cdot I_p \cdot t = \bar{U} \cdot D. \quad (8)$$

Поділивши перше рівняння на друге та використавши співвідношення (5), отримуємо вираз для розрахунку енергетичного ККД зарядно-розрядного циклу як добуток коефіцієнта зниження напруги на коефіцієнт заряду:

$$\eta_w = \frac{W_p}{W_z} = \frac{\bar{U}_p}{\bar{U}_z} \cdot \frac{D}{C} = \eta_U \cdot \eta_q, \quad (9)$$

де $\eta_U = U_p/U_z$ – коефіцієнт зменшення напруги.

Ємність акумулятора у складі ФЕУ зазвичай рекомендується вибирати такою, щоб протягом перших чотирьох годин (до полудня) він заряджався до рівня 75–80% від номінальної ємності, а решту світлового дня поступово до заряджався до максимального можливого рівня. Відповідний алгоритм процесу зарядки наведено на рис. ба.

Згідно із цією вимогою, вважається, що розрядна ємність акумулятора повинна приблизно відповідати добовій продуктивності фотомодуля. Однак, як було показано раніше, будь-які методи заряджання понад 80% призводять до втрат продуктивності фотомодуля або зниження ККД циклу. На практиці зазвичай вибирають акумулятор приблизно вдвічі більшої ємності, щоб забезпечити енергетичний запас на два дні. Проте такий вибір не мінімізує втрати, оскільки заряджання слід виконувати в межах від мінімального рівня $C_{min}=30\%$ до максимального рівня 80% від номінальної ємності, використовуючи лише половину номінальної ємності для досягнення ефективності заряду $\eta_q \rightarrow 1$. Тому необхідно або відмовитися від двох добового запасу енергії, або вибрати акумулятор у четверо більшої ємності відносно добової продуктивності фотомодуля.

Поза рамками цього аналізу залишається питання узгодження зарядної напруги акумулятора з напругою фотомодуля в режимі, наближеному до оптимальної потужності, що графічно показано на рис. 5б. Остання майже завжди перевищує номінальну зарядну напругу акумулятора, що призводить до додаткових утрат потенційної ефективності фотомодуля [9; 11]. Для

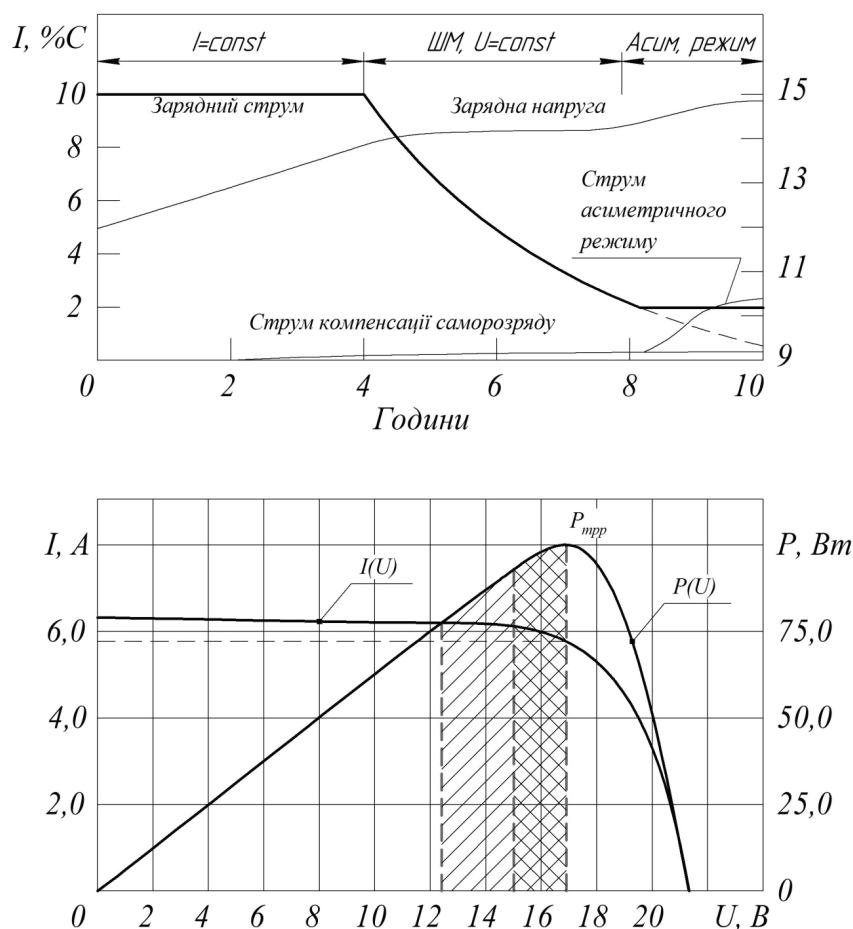


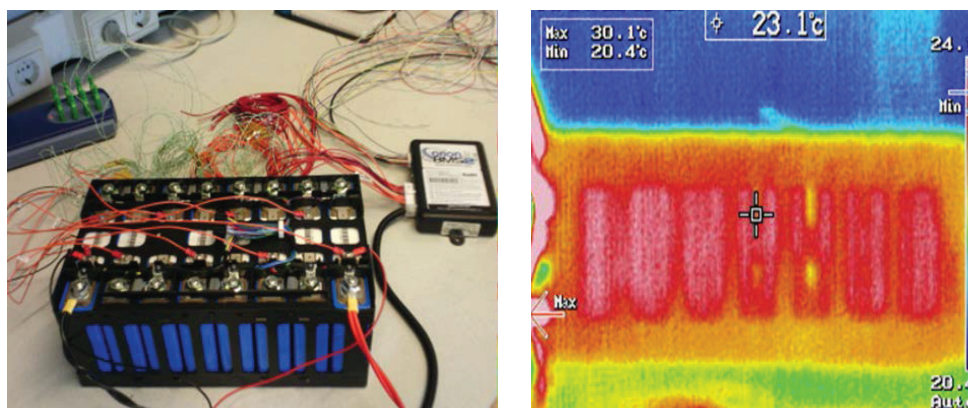
Рис. 6. Типовий алгоритм зарядки у складі ФЕУ (а) та сумісність зарядної напруги з VAX та BPX фотомодуля типу KV100 (б)

вирішення цієї проблеми використовують підбір кількості сонячних елементів у фотомодулі [9] або впровадження проміжного акумулятора (суперконденсатора) із формуванням зарядних імпульсів із необхідними параметрами [12] та інші методи.

Температура в комірках під час розряду змінюється більш істотно, ніж під час заряджання. Процес заряджання для літій-іонних батарей (LiB) відбувається у режимі постійного струму – постійної напруги (CC–CV). Це означає, що коли напруга досягає межі відсічення, постійний струм у першій частині заряджання зменшується, і заряджання триває у режимі постійної напруги.

Згідно з нашими попередніми дослідженнями та інфрачервоним на рис. 7, для моніторингу температури поверхні було вибрано місце посередині клітини. Виявлено, що різниця температури між коміркою 2 і коміркою 6 у цьому старому модулі становить майже 2°C , що підкреслює необхідність належної системи управління температурою в твердотільних батареях. Слід зазначити, що деградовані комірки можуть впливати на сусідні, підвищуючи їхню робочу температуру і, отже, прискорюючи процес старіння.

Інфрачервоне зображення модуля демонструє розподіл температури на поверхні комірок усередині модуля під час розряду з током $1\text{ C}_{\text{н}}$. Модуль використовувався протягом восьми років і пройшов значну кількість циклів заряджання та розряджання, досягнувши 70% від початкової потужності. Для більш детальних вимірювань температури була використана 8-канальна термопарна система типу К для моніторингу температури поверхні (на фото а).



а)
б)
Рис. 7. Модуль (а) та інфрачервоне зображення (б)

Інфрачервона камера застосовувалася для відстеження температурного розподілу на поверхні комірок у модулі.

Отже, для зменшення непродуктивних утрат енергії у фотоелектричних установках слід дотримуватися таких рекомендацій:

- Зарядно-розрядні струми не повинні перевищувати $0,1 C_n$.
- Зарядно-розрядний цикл акумулятора слід обмежити інтервалом від 0,25–0,30 до 0,75–0,80 від номінальної ємності.
- Ємність проєктованої фотоелектричної установки повинна бути розрахована на 2–2,5 рази більше за добову продуктивність фотомодуля.
- Оскільки точка оптимальної потужності фотомодуля зазвичай перевищує діапазон зарядних напруг акумулятора, для повнішого використання потенціалу фотоелектричних систем доцільно використовувати додаткове пікове навантаження.

Висновки. Вирішення термінової потреби в стійких рішеннях для пом'якшення екологічних наслідків акумуляторів підкреслює критичну важливість розроблення механізму управління великою кількістю батарей, які досягають кінця свого першого життєвого циклу. Хоча акумулятори на основі вторинного використання мають явні переваги, повторне використання акумуляторів для вторинного використання катіонів створює певні складнощі. Різноманітні виклики потребують нашої уваги та креативного підходу, але подолання цих труднощів часто веде до інновацій і прогресу в цій галузі. Це дослідження детально розглядає пов'язані складнощі та виклики, щоб зрозуміти реальність і потенційні бар'єри.

Основна мета полягає у підвищенні ефективності використання цих акумуляторів у програмах відновлення, пропонуючи передове бачення щодо різноманітних методів, які можуть підвищити життєздатність батареї і подолати вузькі місця. Значну частину цього огляду присвячено викликам, пов'язаним зі скринінгом усередині акумуляторної батареї. Існує багато різних вимірювальних методів і аналізів акумуляторних модулів, кожен з яких відрізняється за сферою застосування, складністю, витратами часу та точністю. Досліджувані методи включають вимірювання ємності акумулятора, аналіз додаткової ємності, аналіз диференціальної напруги, диференціальну термовольтамперометрію та електрохімічну імпедансну спектроскопію. Точність різних методик оцінки стану батареї та їх складність змінюються залежно від програми відновлення та її чутливості до точних вимірювань. Часто компроміс між різними показниками ефективності є вирішальним для забезпечення достатньої застосовності.

Комбінування окремих методів або використання гібридних підходів для оптимізації ефективності процесу оцінювання можна розглядати як перспективну стратегію. Дослідження акумуляторів усе ще знаходяться на початковій стадії, з очікуванням подальших розробок у наступні роки для усунення існуючих прогалин. Ключовим аспектом подолання цих прогалин є отримання глибшого розуміння процесів деградації батарей у різних хімічних середовищах, що є критично важливим для вирішення проблем, які впливають на довгострокову продуктивність, надійність і стабільність тривалої роботи батарей. Оскільки на деградацію батарей значно впливає її попередня історія використання, доступ до даних із початкового життєвого циклу є важливим для стимулювання зростання ринку джерел безперебійного живлення за допомогою фотоелектричних установок. Майбутнє використання акумуляторів, безсумнівно, залежить від технологій досягнення та спільних зусиль між зацікавленими сторонами для встановлення прозорих протоколів збору, аналізу та обміну даними між дослідниками, учасниками галузі та політиками.

Отже, повторне використання акумуляторів стало нагальною проблемою, що підвищує важливість вирішення пов'язаних із цим питань у сфері безперебійного живлення приватного сектору. Окрім того, новітні тенденції та конструкції акумуляторних батарей, а саме аноди на основі кремнію та катоди з низьким вмістом кобальту в поєднанні з літій-металевими анодами, які виходять за межі традиційної літій-іонної хімії (натрієві батареї), обіцяють зменшити витрати, покращити безпеку, продуктивність і ефективність щільності енергії. Ці досягнення, безумовно, вплинуть на продуктивність та екологічні аспекти, а також на потенційні переваги вторинного використання, що вимагатиме подальших досліджень, включаючи оцінку впливу та життєвого циклу акумуляторної батареї.

Список використаних джерел

1. Ferreira B. Batteries the New Kids on the Block. *IEEE Power Electron. Mag.* 2019, 6, 32–34. <https://doi.org/10.1109/MPEL.2019.2947980>
2. Vermeer W. Bauer P. A Comprehensive Review on the Characteristics and Modeling of Lithium-Ion Battery Aging. *IEEE Trans. Transp. Electr.* 2022, 8, 2205–2232. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3138357>
3. Krishan O., Suhag S. An updated review of energy storage systems: Classification and applications in distributed generation power systems incorporating renewable energy resources. *Int. J. Energy Res.* 2019, 43, 6171–6210. <https://doi.org/10.1002/er.4285>
4. Estimated Capacity of Lithium-Ion Batteries Placed on the Global Market in 2020 with Forecast for 2021 through 2030 (in Gigawatt Hours). Available online: <https://www.statista.com/statistics/1246914/capacity-of-lithium-ion-batteries-placed-on-the-global-market>
5. IEA. Electric Car Sales, 2016–2023. 2023. Available online: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-car-sales-2016-2023>
6. At Least Two Thirds of Global Car Sales Will Be Electric by 2040–Bloomberg. Available online: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-08-09/at-least-two-thirds-of-global-car-sales-will-be-electric-by-2040>
7. Jinlei S., Lei P., Ruihang L., Qian, M., Chuanyu T., Tianru W. Economic operation optimization for 2nd use batteries in battery energy storage systems. *IEEE Access* 2019, 7, 41852–41859.
8. Nováková K., Pražanová, A., Stroe D.I., Knap V. Second-Life of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles: Concept, Aging, Testing, and Applications. *Energies* 2023, 16, 2345.
9. Yang Y., Qiu J., Zhang C., Zhao J., Wang G. Flexible Integrated Network Planning Considering Echelon Utilization of Second-Life of Used Electric Vehicle Batteries. *IEEE Trans. Transp. Electr.* 2021, 8, 263–276. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3068121>
10. Millions of Electric Car Batteries Will Retire in the Next Decade. What Happens to Them?|Environment|The Guardian. Available online: <https://www.theguardian.com/environment/2021/aug/20/electric-car-batteries-what-happens-to-them>



11. Abdelbaky M., Peeters J.R., Dewulf W. On the influence of second use, future battery technologies, and battery lifetime on the maximum recycled content of future electric vehicle batteries in Europe. *Waste Manag.* 2021, 125, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J. WASMAN.2021.02.032>
12. Ettxandi-Santolaya M., Casals L.C., Montes T., Corchero C. Are electric vehicle batteries being underused? A review of current practices and sources of circularity. *J. Environ. Manag.* 2023, 338, 117814.
13. Li J., He S., Yang Q., Wei Z., Li Y., He H. A Comprehensive Review of Second Life Batteries Towards Sustainable Mechanisms: Potential, Challenges, and Future Prospects. *IEEE Trans. Transp. Electrification.* 2022, 9, 4824–4845. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3220411>
14. Martinez-Laserna E., Gandiaga I., Sarasketa-Zabala E., Badedo J., Stroe D.I., Swierczynski M., Goikoetxea A. Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 93, 701–718. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.04.035>
15. Illa Font C.H., Siqueira H.V., Machado Neto J.E., Santos, J.L.F.d., Stevan Jr S.L., Converti A., Corrêa F.C. Second Life of Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles: A Short Review and Perspectives. *Energies* 2023, 16, 953.
16. Korobka, S., Syrotyuk, S., Zhuravel, D., Boltianskyi, B., Boltianska, L. Solar dryer with integrated energy Unit. *Problems of the Regional Energetics*, 2021, (2). 60–75.
17. Syrotyuk S., Boyarchuk V., Syrotyuk V., Korobka S., Syrotyuk H., Boltianskyi B. Peculiarities of modeling heat pumps in the labview environment. *Інформаційні технології в енергетиці та агропромисловому комплексі : матеріали XI Міжнар. наук. конференції, м. Львів, 04–06 жовтня 2022 р. / за заг. ред. В.В. Снітинського. Львів : ЛНУП, 2022. С. 16–18.*
18. Болтянська Л.О., Болтянський Б.В. Альтернативні напрями енергозбереження в домогосподарствах населення. *XII Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція «Ефективність функціонування сільськогосподарських підприємств». Проблематика 2023: «Функціонування сільськогосподарських підприємств на засадах циркулярної економіки» : матеріали Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції, м. Дубляни, 6–7 червня 2023 р. / за ред. проф. Г.В. Черевка. Львів : Галицька видавнича спілка, 2023. С. 26–30.*
19. Енерго- та ресурсозбереження в тваринництві : підручник / Б. В. Болтянський та ін. Київ : Кондор, 2020. 410 с.
20. Упровадження геліосушарок для виробництва висушених сільськогосподарських продуктів / С.В. Коробка та ін. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету.* 2024. Вип. 14. Т. 2. DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-2-7.
21. Serhiy Syrotyuk, Volodymyr Halchak, Vasyl Lopushniak, Serhii Korobka, Hanna Syrotyuk, Taras Stanytskyi, Kateryna Yankovska, Tomasz Jakubowski, Jan Gielżeczki, Boris Boltyanskyi. The application of fuzzy logic algorithms in controllers for controlling the use of renewable energy sources. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, ISSN 0033-2097, R. 101 NR 2/2025. P. 125–132. DOI:10.15199/48.2025.02.30.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2025

S. Korobka¹, B. Boltianskyi², R. Skliar², I. Stukalets¹, R. Sheremeta¹

¹ Lviv National Stepan Gzhytsky University of Veterinary Medicine and Biotechnology

² Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

JUSTIFICATION OF THE ENERGY ANALYSIS OF THE PHOTOMODULE-BATTERY SYSTEM

Summary

The paper analyzes the influence of the parameters of the charge-discharge process on the energy efficiency of batteries. By comparing the loading characteristics of a typical photomodule with the charging characteristics of a battery, the main reasons for efficiency losses in photovoltaic installations have been determined. The obtained regularities must be taken into account when designing the structure of photovoltaic installations and developing algorithms for their operation for the most efficient use of solar energy.



Addressing the urgent need for sustainable solutions to mitigate the environmental impacts of batteries highlights the critical importance of developing a mechanism to manage the large number of batteries reaching the end of their first life cycle. While secondary-use batteries have clear advantages, the reuse of cation-based secondary-use batteries poses certain challenges. A variety of challenges require our attention and creative approach, but overcoming these challenges often leads to innovation and progress in the field. This study examines the associated complexities and challenges in detail to understand the reality and potential barriers.

Combining individual methods or using hybrid approaches to optimize the efficiency of the evaluation process can be considered as a promising strategy. Battery research is still in its infancy, with further developments expected in the coming years to address existing gaps. A key aspect of addressing these gaps is gaining a deeper understanding of battery degradation processes in different chemical environments, which is critical to addressing issues that affect long-term battery performance, reliability, and stability over extended periods of operation.

These advances will certainly impact performance and environmental aspects, as well as potential benefits of secondary use, which will require further research, including impact and battery life cycle assessments.

Keywords: photomodule, photovoltaic installation, battery, charging current, charging voltage, efficiency.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-22>

УДК 631.37:631.3.00.65

В. П. Кувачов, докт. техн. наук

В. М. Дружич, аспірант

С. О. Шевченко, аспірант

К. О. Зеленов, аспірант

ORCID: 0000-0002-5762-256X

ORCID: 0009-0007-5361-5921

ORCID: 0009-0007-3371-1262

ORCID: 0009-0001-1235-6341

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: volodymyr.kuvachov@tsatu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАВІСНОГО ЗНАРЯДДЯ НА РОЗПОДІЛ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ КОЛЕСАМИ БАГАТОВІСНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗАСОБУ

Анотація. Проблема забезпечення високих тягово-зчіпних властивостей багатовісних енергетичних засобів із навісними сільськогосподарськими знаряддями, розміщеними в їхньому міжколісному просторі, полягає у суттєвому перерозподілі зчіпної ваги на рушіїх. Досліджень у цьому плані було проведено недостатньо. Метою дослідження є підвищення тягово-зчіпних властивостей багатовісних енергозасобів шляхом обґрунтування параметрів їхніх навісних пристроїв і схеми приєднання до них навісних сільськогосподарських машин і знарядь. Наукова новизна полягає в отриманні математичних моделей, використання яких дає змогу обґрунтувати схему і параметри навісного пристрою багатовісного енергетичного засобу під час використання навісних сільськогосподарських знарядь із позиції достатнього зчеплення його рушіїв з опорною поверхнею у технології Controlled Traffic Farming (CTF). Практична цінність досліджень полягає у наданні рекомендацій щодо вибору параметрів розміщення та налаштування навісного пристрою багатовісного енергетичного засобу під час його агрегування з навісним сільськогосподарським знаряддям. У результаті проведених досліджень встановлено, що зміна кутів нахилу центральної тяги навісного пристрою на 10° призводить до зменшення навантаження на передніх колесах енергетичного засобу на 8–12%, що впливає на його зчіпні властивості і, як наслідок, на величину буксування та енерговитрати. Водночас його віддалення від задньої осі на кожні 10 см до центру мас енергозасобу розвантажує задній міст на 5–8%, що негативно впливає на енерговитрати. Подальші дослідження спрямовані на визначення оптимальних параметрів кріплення навісного пристрою на багатовісних енергетичних засобах з урахуванням умов і специфіки роботи в різних технологічних схемах землеробства.

Ключові слова: Controlled Traffic Farming (CTF), ефективність використання техніки, сільськогосподарські технології, підвищення ефективності землеробства, інноваційні агротехнології, подолання голоду.

Постановка проблеми. Із появою багатовісних енергетичних засобів із широким прольотом, що працюють за принципом Controlled Traffic Farming (CTF), виникла необхідність створення нових конструкцій навісних пристроїв, здатних ефективно агрегувати сільськогосподарські машини та знаряддя з ними [1–4]. Традиційні підходи до вдосконалення навісних механізмів здебільшого базуються на існуючих схемах та конструктивних рішеннях, що не враховують нові вимоги до маневреності, точності та ефективності роботи в умовах CTF.

Для оптимальної інтеграції багатовісного енергетичного засобу, який працює в умовах CTF, і навісного сільськогосподарського знаряддя необхідно розробити принципово нову конструкцію навісного пристрою, який забезпечить:

- розміщення навісного пристрою у міжколісному просторі багатовісного енергетичного засобу;
- надійне навісне агрегування с.-г. машин та знарядь без використання у них опорних рушіїв;
- оптимізовану кінематику підйому та опускання с.-г. машин та знарядь.

Особливості навісних с.-г. машин та знарядь, зокрема це відсутність необхідності опорних рушіїв та значні вертикальні навантаження на опорні колеса багатовісного енергетичного засобу, потребують нових рішень у конструкції навісного пристрою. Ефективність агрегування багатовісного енергетичного засобу із сільськогосподарськими машинами та знаряддями залежить від вибору конструкції навісного пристрою на ранніх етапах проєктування, а також від налаштувань і регулювання під час роботи.

Ефективність використання багатовісних енергетичних засобів із широким прольотом у сільському господарстві залишається недостатньою, особливо в поєднанні з напівнавісними та навісними знаряддями. Більшість таких машин та знарядь має власні опорні рушії (колеса), які в процесі роботи знаходяться в агротехнічній плодоносній зоні поля. А це суперечить концепції СТЕ, за якою не відбувається ущільнюючого впливу на ґрунт у плодоносній зоні поля. Водночас у науковій літературі не приділяється достатньо уваги впливу ваги навісного знаряддя на вертикальне навантаження, яке розподіляється на опорні колеса багатовісного енергетичного засобу. Це навантаження має подвійний ефект: збільшення тягового зусилля, що сприяє ефективнішому використанню потужності, та зменшення буксування рушіїв, що веде до зниження енерговитрат. Покращення тягово-зчіпних характеристик багатовісного енергетичного засобу сприяє підвищенню загальної продуктивності його роботи, що є важливим для оптимізації ресурсного використання та підвищення ефективності польових робіт у технології СТЕ.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження впливу схеми та конструктивних параметрів агрегатів із навісними знаряддями є актуальною темою сучасної агроінженерної науки. У науковій літературі висвітлюються різні аспекти функціонування таких агрегатів, зокрема їх стабільність, динамічні характеристики та вплив на енергетичні показники роботи трактора.

Науковцями достатньо опрацьовані питання використання напівнавісних с.-г. машин та знарядь на енергетичних засобах із широким прольотом у технологіях СТЕ [1–4]. Проте використання навісних с.-г. знарядь у представлених роботах не розглядається.

Натомість Volodymyr Bulgakov та ін. у своїй роботі [5] провели аналітичне дослідження умов стабільності функціонування фронтального плуга без опорного колеса. Вони вивели аналітичні залежності та здійснили аналіз результатів їх розрахунку, що дало змогу оцінити вплив основних параметрів плуга на його роботу. Проте дослідження не враховує особливості роботи багатовісних енергетичних засобів у системах СТЕ, зокрема зміну навантаження на опорні колеса під час роботи агрегату в технологічних коліях.

Volodymyr Nadykto та ін. у роботі [6] зосередилися на визначенні вертикальних коливань трактора з фронтальним плугом без опорного колеса. Вони отримали експериментальні дані та проаналізували результати математичного моделювання, що дало змогу виявити чинники, які впливають на стійкість агрегату. Однак автори не врахували специфіку навантаження на рушії у технології СТЕ, де багатовісні енергозасоби повинні працювати в чітко визначених технологічних коліях, що може впливати на зміну тягового зусилля та знос шин.

Подальші експериментальні дослідження впливу фронтального плуга без опорного колеса на стабільність глибини оранки представлено в роботі Petrov G. та Nadykto V. [7]. Автори проаналізували експериментальні дані та обґрунтували рекомендації щодо поліпшення роботи таких агрегатів. Водночас у дослідженні не було розглянуто особливості взаємодії навісного знаряддя з багатовісними енергетичними засобами в умовах СТЕ, де відсутність опорного колеса може змінювати розподіл навантаження між із різних боків енергозасобу з широким прольотом та впливати на керованість агрегату в межах технологічних колій.

У збірниках тез наукових конференцій також висвітлюються окремі аспекти досліджуваної проблематики. Так, Г.А. Петров у роботі [8] проаналізував умови стабільності функціонування

фронтального плуга, але не розглянув динамічний перерозподіл навантажень у процесі руху агрегату в умовах СТФ, де зменшення навантаження на передню вісь може впливати на втрату зчеплення рушіїв з опорною поверхнею технологічної колії. У спільній його роботі з В.Т. Надикто [9] досліджено динаміку вертикальних коливань трактора під час використання фронтального плуга без опорного колеса. Проте авторами не було оцінено вплив вертикальних коливань на стабільність руху енергетичного засобу в технологічних коліях, що є критичним для СТФ.

Узагальнюючи результати аналізу, можна відзначити, що сучасні дослідження зосереджені на вивченні стабільності функціонування навісних с.-г. машин та знарядь без опорних коліс, визначенні їхніх динамічних характеристик та вплив на енергетичні параметри роботи с.-г. трактора. Проте недостатньо уваги приділено питанням адаптації таких агрегатів до умов СТФ, зокрема їх взаємодії з багатовісними енергетичними засобами, у яких навісні пристрої розміщені в їх міжколісному просторі, а також розподілу навантаження між опорними колесами тощо. Подальші дослідження мають урахувати ці аспекти для забезпечення ефективної роботи багатовісних енергетичних засобів у системах СТФ.

Формулювання мети статті. Метою досліджень є підвищення тягово-зчіпних властивостей багатовісних енергетичних засобів шляхом обґрунтування параметрів їхніх навісних пристроїв і схеми приєднання до них навісних с.-г. машин і знарядь.

Основна частина. Для вирішення поставленого завдання складемо умову рівноваги енергетичного засобу з розміщеним навісним знаряддям у його міжколісному просторі в поздовжньо-вертикальній площині. Для цього розглянемо його як фізичне тверде тіло, яке має подовжню площину симетрії, що проходить через центр його мас. З агрегатованою з ним навісним с.-г. знаряддям без опорного колеса представимо його на розрахунковій схемі у вигляді плоскої еквівалентної моделі (рис. 1). Робочі органи с.-г. знарядь на еквівалентній схемі (рис. 1) представимо проєкцією одного ґрунтообробного робочого органу, у якому зосереджена рівнодіюча їх тягового опору (горизонтальний R_x і вертикальний R_y складники, кількісне співвідношення між якими, як відомо, визначається типом самого робочого органу). Указане навісне с.-г. знаряддя агрегатується з енергетичним за допомогою центральної і нижніх тяг його навісного пристрою.

Відповідно до загальноприйнятого принципу про заміну зв'язків силами їхніх реакцій, взаємний вплив енергетичного засобу і сільськогосподарського знаряддя виразимо через сили X і Y , які зосереджено в миттєвому центрі повороту навісного пристрою (точка π , див. рис. 1). При розгляді умови рівноваги енергетичного засобу приймемо позитивний напрямок сил X і Y , а для сільськогосподарського знаряддя – від'ємний.

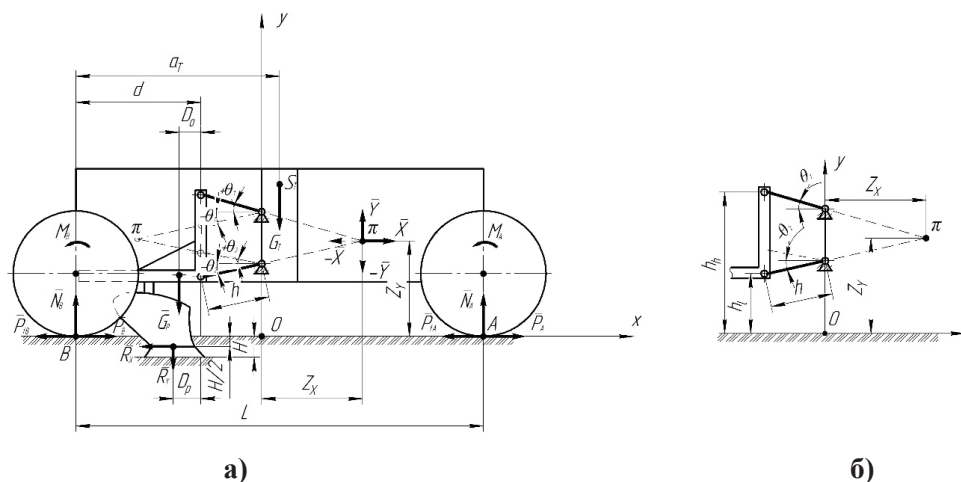


Рис. 1. Схеми сил і моментів, що діють на енергетичний засіб (а) і навісний пристрій (б) у поздовжньо-вертикальній площині

Координати миттєвого центру повороту навісного пристрою енергозасобу (Z_x і Z_y) (див. рис. 1) у процесі його руху змінюються в часі. Але оскільки тренд їхніх коливань малий, то це практично не відбивається на характері перерозподілу вертикальних навантажень на передніх і задніх колесах енергозасобу, тому вони (координати) приймаються постійними.

Із можливих варіантів приєднання навісних машин і знарядь до енергозасобу кути нахилу центральної (θ_1) і нижніх (θ_2) тяг його навісного пристрою можуть бути як позитивними, так і від'ємними або дорівнювати нулю (див. рис. 1б). Через це навісний пристрій енергозасобу залежно від кутів нахилу його центральної і нижніх тяг може мати шість варіантів налаштування:

- 1) $\theta_1 > 0, \theta_2 < 0$;
 - 2) $\theta_1 < 0, \theta_2 > 0$;
 - 3) $\theta_1 \leq 0, \theta_2 < 0, |\theta_1| < |\theta_2|$;
 - 4) $\theta_1 > 0, \theta_2 \geq 0, \theta_1 > \theta_2$;
 - 5) $\theta_1 < 0, \theta_2 \leq 0, |\theta_1| > |\theta_2|$;
 - 6) $\theta_1 \geq 0, \theta_2 > 0, \theta_1 < \theta_2$.
- (1)

Залежно від значень кутів θ_1 і θ_2 нахилу відповідно центральної і нижніх тяг навісного пристрою енергозасобу координати його миттєвого центру повороту (Z_x і Z_y) можуть бути виражені через його ж конструктивні параметри (рис. 1б).

Координати миттєвого центру повороту навісного пристрою енергозасобу в кожному з варіантів (1), відповідно до рис. 1, можуть бути визначені у такий спосіб:

$$\begin{aligned} Z_x &= \frac{h_h - h_l}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2}; \\ Z_y &= h_l - \frac{(h_h - h_l) \cdot \tan \theta_2}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2}, \end{aligned} \quad (2)$$

де Z_x, Z_y – поздовжня і поперечна координати миттєвого центру повороту навісного пристрою енергозасобу;

h_h, h_l – конструктивні параметри енергозасобу, природа яких зрозуміла з рис. 1.

Для розрахунку двох вертикальних реакцій N_A і N_B на передніх і задніх колесах енергозасобу (див. рис. 1) достатньо скласти два рівняння системи, у яких прирівняти до нуля суму проєкцій усіх сил у вертикальній площині і суму їх моментів відносно, наприклад, точки B :

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n (F_k)_y &= 0; \\ \sum_{k=1}^n M_B(F_k) &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\sum_{k=1}^n (F_k)_y$ – сума k -х сил, які діють на енергозасіб у вертикальній площині;

$\sum_{k=1}^n M_B(F_k)$ – сума моментів k -х сил, які діють на енергозасіб відносно точки B .

Моменти M_A і M_B можна виразити у такий спосіб:

$$M_A = (P_A - P_{fA}) \cdot r_A; \quad M_B = (P_B - P_{fB}) \cdot r_B, \quad (4)$$

де P_A, P_B – дотичні сили тяги на передніх і задніх колесах енергозасобу відповідно;

P_{fA}, P_{fB} – сили опору коченню передніх і задніх коліс енергозасобу відповідно;

r_A, r_B – радіуси кочення передніх і задніх коліс енергозасобу.

Ураховуючи, що:

$$P_A = N_A \cdot \varphi; \quad P_{fA} = N_A \cdot f; \quad P_B = N_B \cdot \varphi; \quad P_{fB} = N_B \cdot f, \quad (5)$$

де f – коефіцієнт опору коченню енергозасобу;

φ – коефіцієнт використання зчіпної ваги енергозасобу.

Згідно зі схемою діючих сил (рис. 1), маємо:

$$\begin{cases} N_B = G_T + Y - N_A; \\ N_A = \frac{G_T \cdot a_T - (G_T - Y) \cdot r_A \cdot (\varphi - f) - Y \cdot (Z_x + h \cdot \cos \theta_2 + d) + X \cdot Z_y}{L - (\varphi - f) \cdot (r_A - r_B)}, \end{cases} \quad (6)$$

де G_T, a_T – вага енергозасобу і горизонтальна координата його центра мас;

L – колісна база енергозасобу;

d – відстань від навісного пристрою агрегатованого с.-г. знаряддя до осі задніх коліс енергозасобу;

h – довжина нижньої тяги навісного пристрою енергозасобу.

Для визначення двох невідомих реакцій X і Y достатньо двох незалежних рівнянь його рівноваги:

$$\begin{cases} \sum_{p=1}^m (F_p)_x = 0; \\ \sum_{p=1}^m (F_p)_y = 0, \end{cases} \quad (7)$$

де $\sum_{p=1}^m (F_p)_x$ – сума p -х сил, що діють на с.-г. знаряддя в горизонтальній площині;

$\sum_{p=1}^m (F_p)_y = 0$ – сума p -х сил, що діють на с.-г. знаряддя у вертикальній площині.

Згідно зі схемою діючих сил (см. рис. 1), маємо:

$$\begin{cases} X = R_x; \\ Y = G_p + R_y, \end{cases} \quad (8)$$

G_p – вага с.-г. знаряддя;

R_x, R_y – горизонтальний і вертикальний складники тягового опору с.-г. знаряддя.

Системи рівнянь (6) і (8) дають змогу визначати вертикальні реакції N_A і N_B на передніх і задніх колесах енергозасобу за різних параметрів агрегату, зокрема кутів (θ_1 і θ_2) нахилу тяг навісного пристрою, та інших конструктивних параметрів. З аналізу вказаних виразів випливає, що крім кутів нахилу тяг навісного пристрою, суттєвий вплив на перерозподіл нормальних реакцій на колесах енергозасобу здійснює місце розміщення навісного пристрою у між-колісному просторі енергозасобу (параметр d).

У процесі досліджень указані значення конструктивних параметрів були прийняті такими: $\theta_1 = 25 \dots 55$ град; $\theta_2 = -10$ град; $h_h = 1$ м; $h_l = 0,3$ м; $R_x = 10$ кН; $R_y = 2$ кН; $G_p = 5$ кН; $G_T = 20$ кН; $a_T = 0,8$ м; $L = 1,6$ м; $h = 0,8$ м; $r_A = 0,6$ м; $r_B = 0,6$ м; $\varphi = 0,45$; $f = 0,08$; $d = 0 \dots 0,8$ м.

Аналіз даних математичного моделювання (рис. 2) показує, що ступінь перерозподілу нормальних реакцій на передніх і задніх колесах енергозасобу суттєво залежить від кута нахилу θ_1 центральної тяги його навісного пристрою, на який навішане с.-г. знаряддя без опорного колеса.

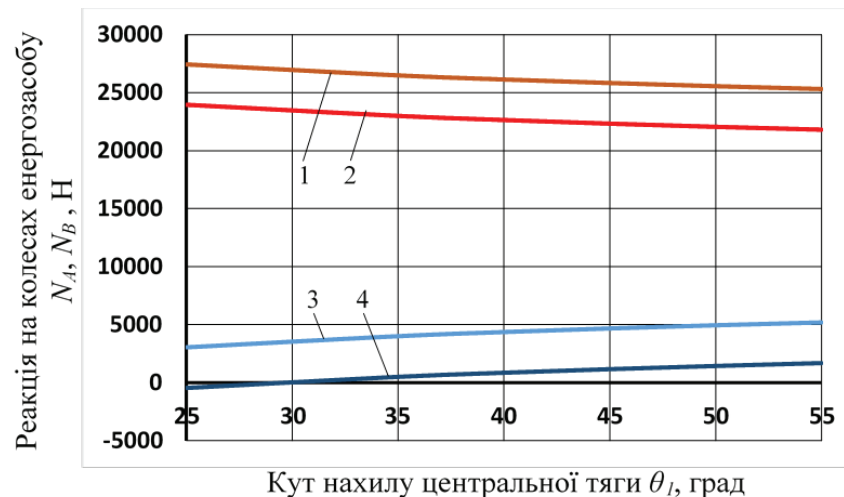


Рис. 2. Ступінь перерозподілу нормальних реакцій на передніх N_B (1, 2), задніх (3, 4) N_A колесах енергозасобу від кута нахилу θ_1 центральної тяги навісного пристрою при відємному нахилі нижніх тяг ($\theta_2 = -10$ град) і за різної відстані d : 1,4 – значення $d = 0,8$ м; 2,3 – значення $d = 0$ м

Аналіз теоретичних досліджень свідчить, що збільшення кута нахилу центральної тяги навісного пристрою спричиняє перерозподіл навантаження між осями багатовісного енергетичного засобу. Зокрема, спостерігається зростання вертикальної реакції на передніх колесах за рахунок зменшення реакції на задніх, що змінює баланс силових впливів на опорну поверхню. Це, своєю чергою, позначається на тягово-зчіпних характеристиках багатовісного енергозасобу та його стійкості під час руху, особливо в умовах нерівномірного рельєфу або змінних характеристик опорної поверхні його руху.

Указане пояснюється аналізом рівноваги сил і моментів, що діють на енергетичний засіб із навісним знаряддям, розташованим у його міжколісному просторі. За збільшення кута нахилу центральної тяги змінюється точка прикладання силової реакції, що спричиняє перерозподіл вертикального навантаження: навантаження на задніх колесах зростає, тоді як на передніх – зменшується. Це може поліпшити тягове зусилля задніх коліс, забезпечуючи кращу реалізацію потужності двигуна, але водночас знижує курсову стійкість агрегату. В умовах технології STF, де точність руху та прогнозованість траєкторії є критично важливими чинниками, така зміна балансу сил може створювати додаткові труднощі для оператора або автоматизованої системи керування енергозасобом.

Якщо ж навісний пристрій зміщувати ближче до центру мас енергетичного засобу, виникає протилежний ефект: зменшується вертикальна реакція на задній осі, що може спричинити її критичне розвантаження. У разі досягнення порогового значення це може призвести до часткової або повної втрати контакту задніх коліс з опорною поверхнею, що робить багатовісний енергозасіб нестабільним і знижує ефективність його роботи. Особливо це небезпечно в умовах підвищеної вологості ґрунту або роботи на схилах, де відсутність достатньої ваги на задніх колесах може призвести до пробуксовування або навіть втрати керованості.

За значного зміщення навісного пристрою вперед відносно задньої осі енергозасобу зростає навантаження на передню вісь, що може спричинити перевантаження передніх коліс, нерівномірний розподіл тягового зусилля. Це також може впливати на знос шин, збільшувати енергетичні витрати на подолання опору коченню та знижувати загальну ефективність роботи багатовісного енергозасобу.

Таким чином, для забезпечення стійкої роботи багатовісного енергетичного засобу в умовах технології STF доцільно оптимізувати положення навісного пристрою, розміщуючи його



якогома ближче до задньої осі. Це дасть змогу рівномірніше розподіляти навантаження між його опорними колесами, зменшувати буксування та поліпшити реалізацію тягового зусилля. Окрім того, правильне розташування навісного пристрою у міжколісному просторі енергозасобу мінімізує негативний вплив на курсову стійкість, забезпечуючи більш точний рух агрегату в польових умовах.

Додатково слід урахувувати вплив ваги навісного знаряддя на динамічну поведінку агрегату. Зміщення центру мас навісного пристрою у напрямку задньої осі може зменшувати коливання під час руху, що позитивно вплине на рівномірність обробітку ґрунту або внесення добрив. Водночас нехтування налаштуванням кутів нахилу тяг на навісному пристрої із навісним с.-г. знаряддям може створювати небажаний ефект «підйому» передньої частини енергетичного засобу, що погіршить його керованість та може вимагати додаткових заходів щодо стабілізації руху агрегату.

З огляду на це, для забезпечення раціонального розподілу навантажень та стабільності руху багатовісного енергетичного засобу за навісного розміщення сільськогосподарського знаряддя у його міжколісному просторі доцільно мінімізувати відстань між ним і задньою віссю енергозасобу. Це дає змогу зберегти оптимальний баланс навантажень на всі опорні колеса енергетичного засобу, зменшити буксування та підвищити ефективність реалізації тягового зусилля, що є ключовими умовами успішного застосування технології СТФ у сучасному землеробстві.

Висновки.

1. Вплив параметрів навісного пристрою з розміщеному на ньому навісному с.-г. знарядді на розподіл вертикального навантаження між передніми та задніми колесами багатовісного енергозасобу є суттєвим. Зміна кутів нахилу центральної навісного пристрою на 10° призводить до перерозподілу навантаження на передні колеса на 8–12%, що впливає на зчіпні властивості енергетичного засобу і, як наслідок, на буксування та енерговитрати.

2. Зміщення навісного пристрою ближче до задньої осі сприяє рівномірному розподілу навантажень та поліпшенню тягово-зчіпних характеристик багатовісного енергетичного засобу. Тоді як його віддалення від задньої осі на кожні 10 см до центру мас енергозасобу розвантажує його задній міст на 5–8%, що негативно впливає на енерговитрати. Значне зміщення вперед навісного пристрою з навісним с.-г. знаряддям може викликати критичне розвантаження задньої осі, що призводить до втрати контакту задніх коліс з опорною поверхнею і зниження ефективності роботи агрегату.

3. Урахування конструктивних параметрів навісного пристрою та їх взаємодії з багатовісними енергетичними засобами дає змогу значно підвищити ефективність роботи агрегатів у системах СТФ. Зменшення буксування, економія енерговитрат та поліпшення тягово-зчіпних характеристик багатовісних енергетичних засобів свідчать про потенціал для зниження витрат і підвищення продуктивності їхньої роботи під час використання таких технологій. Але технологія СТФ вимагає оптимізації схеми та параметрів навісного пристрою для мінімізації впливу на стійкість руху та забезпечення ефективного використання енергетичного засобу в польових умовах.

Подальші дослідження спрямовані на визначення оптимальних параметрів кріплення навісного пристрою у міжколісному просторі енергозасобу з широким прольотом з урахуванням змінних польових умов і специфіки роботи в різних технологічних схемах землеробства.

Список використаних джерел

1. Kuvachov V.P. Justification of the parameters a rear-mounted linkage wide span tractor (vehicle). *Вісник ХНТУСГ*. 2019. Вип. 199. С. 32–48.
2. Bulgakov V., Holovach I., Kuvachov V. et al. Theoretical investigation of a rear-mounted linkage for wide-span tractors. *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources*. 2018. № 1. Р. 11–14.

3. Bulgakov V., Melnik V., Kuvachov V. et al. Theoretical study on linkage unit of wide span tractor. *Proceedings 29th DAAAM International symposium «Intelligent manufacturing and automation»*. 2018. P. 0180–0189.
4. Bulgakov V., Melnik V., Kuvachov V. et al. Theoretical study on linkage unit of wide span tractor. *Proceedings 29th DAAAM International symposium «Intelligent manufacturing and automation»*. 2018. P. 0180–0189.
5. Bulgakov V., Ivanovs S., Nadykto V., Petrov Gennadii. Investigation of front plough functioning stability conditions without support wheel. *Engineering for Rural Development*. 2023. P. 562–570.
6. Nadykto V., Golub G., Kyurchev V. et al. Determining Vertical Oscillations of Front-Plow Tractor Without Support Wheel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2024. Volume 1. Issue 7. P. 37–47.
7. Petrov G., Nadykto V. Ploughing depth stability with front plough without support wheel. *Technical service of agriculture, forestry and transport*, 2024. № 25. С. 110–118.
8. Петров Г.А. Дослідження умов стабільності функціонування фронтального плуга без опорного колеса. *Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання»*. Київ : НУБіП України, 2023. С. 238–239.
9. Петров Г.А., Надикто В.Т. Динаміка вертикальних коливань трактора з фронтальним плугом без опорного колеса. *Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання»*. Київ : НУБіП України, 2024. С. 162–163.

Стаття надійшла до редакції 30.03.2025

V. Kuvachov, V. Druzhyh, S. Shevchenko, K. Zelenov

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

RESEARCH ON THE IMPACT OF MOUNTED IMPLEMENTS ON LOAD DISTRIBUTION AMONG THE WHEELS OF A MULTI-AXLE POWER UNIT

Summary

The problem of ensuring high traction and adhesion properties of multi-axle power units equipped with mounted agricultural implements, positioned within their inter-wheel space, lies in the significant redistribution of coupling weight across the driving wheels. Research in this area remains insufficient. The aim of the study is to enhance the traction and adhesion properties of multi-axle power units by substantiating the parameters of their mounting systems and the attachment configurations of mounted agricultural machines and implements.

The scientific novelty of the study consists in developing mathematical models that enable the justification of the mounting system layout and parameters of a multi-axle power unit when using mounted agricultural implements, ensuring sufficient wheel-to-ground adhesion within the Controlled Traffic Farming (CTF) technology.

The practical value of the research lies in providing recommendations for selecting the placement parameters and settings of the mounting system in multi-axle power units when aggregating them with mounted agricultural implements.

The study results indicate that adjusting the tilt angle of the central linkage of the mounting system by 10° leads to an 8–12% reduction in the load on the front wheels of the power unit, which influences its adhesion properties and, consequently, the slip rate and energy consumption. At the same time, shifting the linkage 10 cm further from the rear axle towards the center of mass unloads the rear axle by 5–8%, negatively affecting energy efficiency.

Further research will focus on determining the optimal attachment parameters for mounting systems on multi-axle power units, considering field conditions and the specifics of various agricultural technology schemes.

Keywords: Controlled Traffic Farming (CTF), efficiency of machinery use, agricultural technologies, improving farming efficiency, innovative agro-technologies, hunger eradication.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-23>

УДК 637.134.001.57

Н. О. Паляничка, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-8510-7146

О. О. Червоткіна, асистент

ORCID: 0000-0002-6814-0566

О. О. Ковальов, канд. техн. наук, ст. викладач

ORCID: 0000-0002-4974-5201

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: nadiia.palanychka@tsatu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДИСПЕРГУВАННЯ НА ПІДПРИЄМСТВІ З ВИРОБНИЦТВА МОЛОЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Анотація. У статті розглянуто дослідження впровадження енергоощадного обладнання для процесу диспергування молока. Попередній аналіз засвідчив, що традиційне устаткування для гомогенізації характеризується високим енергоспоживанням, що є вагомим недоліком в умовах сучасного виробництва. Теоретичне обґрунтування дало змогу відокремити перспективний варіант – пульсаційний гомогенізатор. Його застосування забезпечує зниження енергозатрат за збереження якості готової продукції. У роботі визначено ключові конструктивні характеристики пульсаційного гомогенізатора та представлено зовнішній вигляд дослідного зразка. Також було здійснено попереднє тестування роботи цього пристрою в умовах виробничої лінії пастеризованого питного молока на молокопереробному підприємстві. Отримані результати підтверджують, що після обробки пульсаційним гомогенізатором молоко зберігає високі якісні показники, а енергоспоживання значно менше порівняно з клапанними моделями гомогенізаторів.

Ключові слова: гомогенізація, диспергування, молоко, пульсаційний гомогенізатор, експериментальний зразок, випробування, енергоощадність.

Постановка проблеми. Диспергуванням називають процес тонкого подрібнення твердих або рідких речовин у середовищі, що їх оточує, у результаті чого утворюється більш однорідна система, наприклад емульсія чи суспензія. Ця технологічна операція широко застосовується у фармацевтичній, хімічній, косметичній промисловості, в аграрному секторі, а також у харчовій та переробній галузях [1]. У межах переробної промисловості особливе значення диспергування має в процесах переробки молока. Завдяки подрібненню молочного жиру покращуються органолептичні властивості продукту, підвищується його стійкість до зберігання, а також засвоюваність жирів організмом. Для реалізації цієї операції використовують спеціалізоване обладнання – гомогенізатори. Найбільш поширеним серед них залишається клапанний гомогенізатор, який активно застосовується на сучасних підприємствах [2]. Популярність цього типу апаратів зумовлена їхньою технологічною простотою та здатністю забезпечити високоякісний результат. Водночас клапанні гомогенізатори мають низку суттєвих недоліків, зокрема: високе енергоспоживання, значні габарити, велика маса та висока вартість. Незважаючи на це, вони залишаються домінуючим рішенням у виробництві через відсутність ефективних альтернатив, здатних забезпечити належний рівень гомогенізації. У зв'язку із цим актуальним є завдання розроблення нових типів гомогенізуючого обладнання, що дадуть змогу досягти необхідного ступеня диспергування з істотно нижчими енергетичними витратами, а також аналіз ефективності їх застосування на молокопереробних підприємствах.

Аналіз останніх досліджень. Проблематику диспергування молочного жиру вивчали чимало дослідників, серед яких варто відзначити В.В. Вайткуса, Н.В. Барановського, В.Я. Грановського, Ю.Ф. Дітякіна, М.А. Promtov, М.Н. Ліпатова, Є.В. Нужина, Р. Drankhar, С. Liu, Y. Lu, С. Trägårdh

[2–6]. Аналіз наукових джерел свідчить, що досі не сформовано єдиної загальноприйнятої теоретичної моделі процесу гомогенізації [1; 7]. Основними причинами цього є мікроскопічні розміри жирових глобул і висока швидкість їх переміщення, що суттєво ускладнює дослідницьке спостереження. До того ж значну частину наукових робіт присвячено вивченню гомогенізації у клапанних пристроях, які, як зазначалося раніше, мають високий рівень енергоспоживання [4; 5]. У ході огляду літератури було виявлено перспективний різновид обладнання – пульсаційний гомогенізатор, який здатний ефективно диспергувати жирову фазу до розмірів, що відповідають технологічним вимогам, при цьому витрачаючи значно менше енергії, ніж традиційний клапанний апарат [7; 8]. У зв'язку із цим подальше дослідження процесу було зосереджено саме на застосуванні пульсаційного типу гомогенізатора.

Формулювання мети статті. Метою статті є аналіз застосування пристрою для гомогенізації пульсаційного типу в технологічній лінії виробництва питного молока на підприємстві з переробки молока.

Основна частина. Проведений теоретичний огляд дав змогу з'ясувати, що для отримання кінцевого продукту з високим рівнем дисперсності за умов невеликих енергетичних витрат доцільним є використання пульсаційного пристрою для гомогенізації.

Попередній аналіз наявних теоретичних напрацювань засвідчив, що конструкція такого пристрою повинна включати технологічні ємності для подавання молока та накопичення гомогенізованого продукту, перепускні клапани, робочу камеру з ударним поршнем, а також привод і насос [9]. З огляду на результати аналізу, для подальших досліджень було змодельовано робочу камеру пульсаційного гомогенізатора у тривимірному середовищі автоматизованого проєктування SolidWorks. Відповідну схему наведено на рис. 1.

Для перевірки ефективності функціонування зазначеного типу технологічного обладнання, а також для здійснення експериментальних досліджень на молокопереробному підприємстві було розроблено та виготовлено дослідний зразок пульсаційного пристрою для гомогенізації [10].

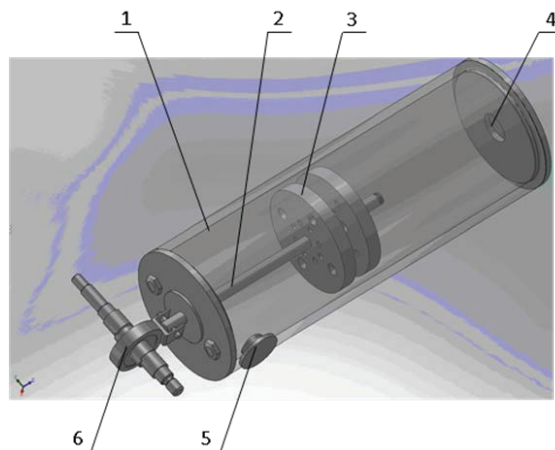
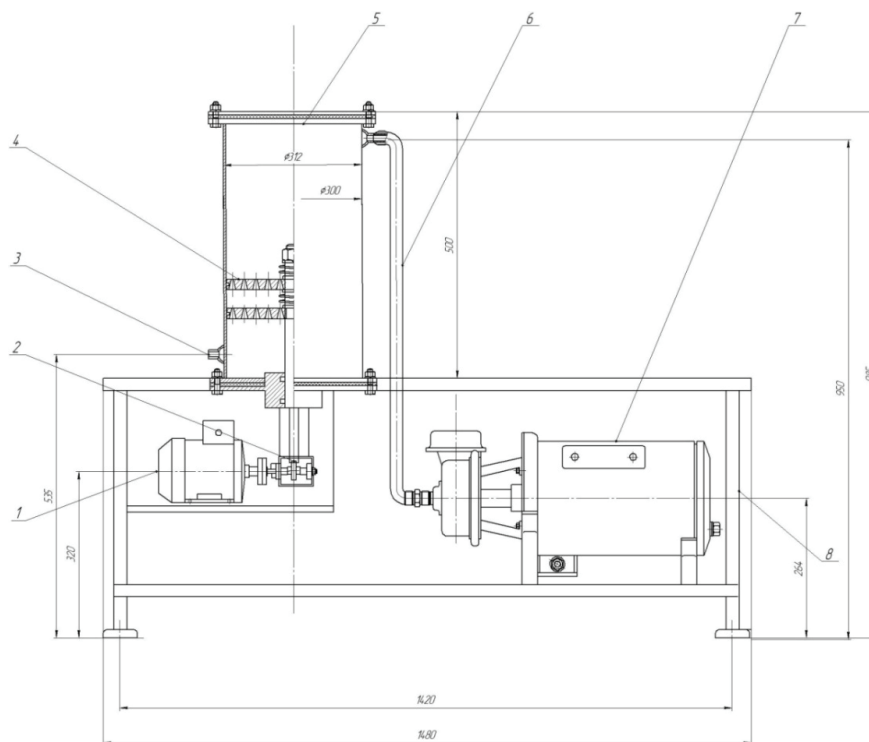


Рис. 1. Конструктивна модель робочої камери імпульсного пристрою для гомогенізації, створена у середовищі SolidWorks: 1 – корпус у вигляді циліндра; 2 – штоковий елемент; 3 – поршні ударного типу; 4 – вхідний патрубок для подачі молока; 5 – вихідний патрубок для забору гомогенізованого продукту; 6 – кривошипно-шатунний механізм

Підсумки розрахунку основних конструктивних характеристик дослідного зразка пульсаційного гомогенізатора для виготовлення дослідного зразку гомогенізатора представлено в табл. 1.

Розрахункові дані параметрів дослідного зразка пульсаційного гомогенізатора

Загальний вигляд випробувального зразка пульсаційного типу гомогенізатора приведено на рис. 2.



Процес виготовлення випробувального зразка пульсаційного типу гомогенізатора супроводжувався суворим дотриманням вимог щодо вибору матеріалів [11]. Елементи та вузли пристрою, які під час експлуатації контактують із продуктом (ємність, камера гомогенізатора, шток, ударний поршень, верхня та нижня кришки, патрубок), були виготовлені з високоякісної

харчової нержавіючої сталі. Такий матеріал запобігає процесам окиснення і не змінює органолептичних властивостей продукту. Трубопроводи виготовлялися зі спеціалізованого ПВХ, що допускається до використання у харчовій промисловості. Для перепускних вентилів вибрали леговану харчову корозійностійку сталь, латунь або мідь, які не піддаються окисненню та витримують робочі тиски, характерні для роботи установки.

Дослідні випробування пульсаційного типу гомогенізатора були виконані на базі приватного підприємства «Молокозавод-ОЛКОМ» у складі виробничої лінії з випуску пастеризованого питного молока [11].

Схематичне зображення процесу виготовлення питного молока із застосуванням пульсаційного типу гомогенізатора наведено на рис. 3. У даній модифікованій версії технологічна послідовність виробництва залишилася незмінною за винятком параметрів функціонування гомогенізуючого пристрою пульсаційного типу. Оптимальна температура молока для проведення гомогенізації у пільсаційному гомогенізаторі становить 65...70 °С. При цьому частота та амплітуда коливань ударних поршнів дорівнюють 55...59 Гц і 10...12 мм відповідно, за умови подачі молока в межах 1800...2000 кг/год.

Молоко надходить у балансний танк 3, звідки за допомогою насоса 1 транспортується до пластинчастої охолоджувальної установки 4 для первинного охолодження. Потім охолоджене молоко тим же насосом 1 подається на процес нормалізації 5, який здійснюється безперервно в потоці. Отримана нормалізована суміш надходить у пластинчасту пастеризаційно-охолоджувальну установку 6, де проходить підігрів перед сепарацією та очищенням у сепараторі-молокоочиснику 7.

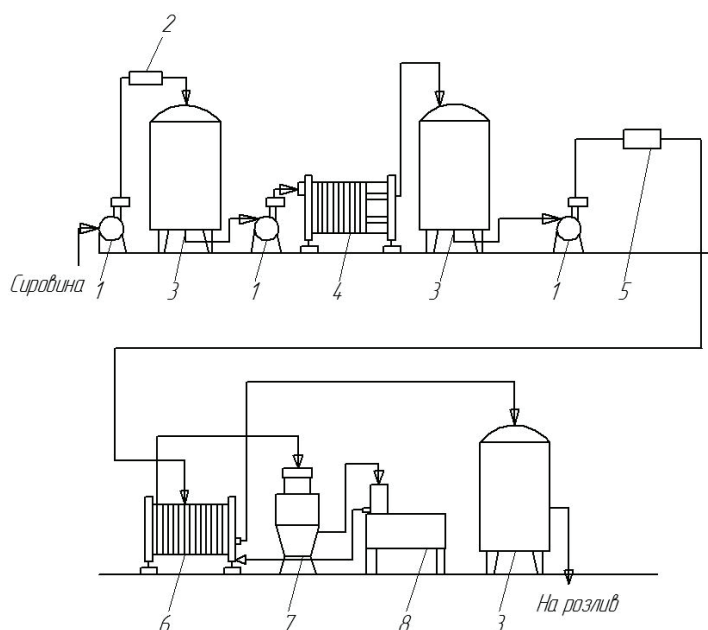
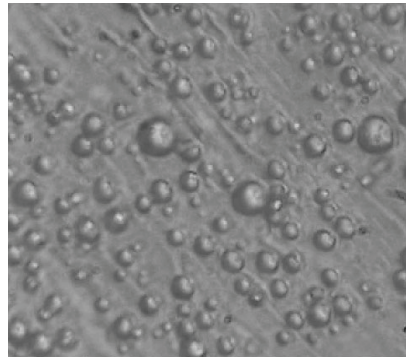


Рис. 3. Схематичне зображення технологічної лінії виробництва питного молока із застосуванням пульсаційного гомогенізатора: 1 – молочні насоси; 2 – пристрій для обліку об'єму молока; 3 – резервуари для балансування молока; 4 – пластинчастий охолоджувач; 5 – обладнання для нормалізації молока; 6 – пластинчастий апарат для пастеризації та охолодження; 7 – сепаратор для очищення молока; 8 – пульсаційний пристрій для гомогенізації

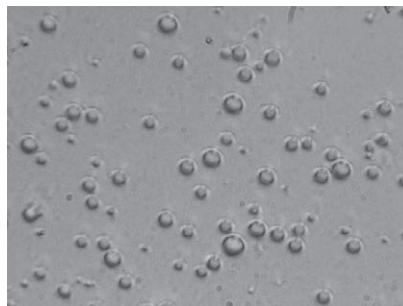
Після етапу очищення проводиться гомогенізація за допомогою пульсаційного гомогенізатора 8. Далі молоко знову подається в установку 6, де послідовно проходить пастеризацію та охолодження, після чого спрямовується на стадії розливу і фасування. За результатами випро-

бувань пульсаційного типу гомогенізатора зафіксовано значне зменшення споживаної потужності приводу – з 18,5 кВт до 2 кВт.

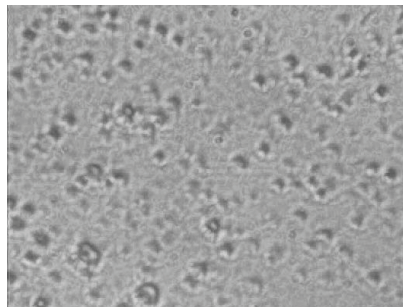
На рис. 4 представлено мікрофотографії зразків молочної сировини після гомогенізації в пульсаційному гомогенізаторі, проведеної у порівнянні з клапанним типом гомогенізатора.



а)



б)



в)

Рис. 4. Мікрофотографії зразків молока (збільшення $\times 400$): а) молоко без обробки; б) після гомогенізації клапанним методом за перепадом тиску $\Delta p=16$ МПа; в) після пульсаційної гомогенізації при тиску $p=1,5$ МПа

Перед гомогенізацією молоко мало такі характеристики: середній діаметр жирових кульок становив 2,48 мкм, дисперсія – 1,66, а коефіцієнт варіації (показник розсіювання ознаки відносно середнього значення) – 67%. Після проведення гомогенізації клапанним та пульсаційним способами ці показники змінилися: середній діаметр жирових кульок становив відповідно 0,98 мкм і 0,80 мкм, дисперсія – 0,50 та 0,46, коефіцієнт варіації – 51% і 56%.

Результати експериментів довели, що за застосування пульсаційного типу гомогенізатора середній розмір жирових кульок зменшився на 19% порівняно з клапанним типом. Одночасно із цим спостерігалось зниження дисперсії, що підтверджує ефективність вибраних параметрів

і режимів роботи пульсаційного гомогенізатора для забезпечення стабільності жирової фази після гомогенізації.

Пастеризоване молоко, виготовлене із застосуванням пульсаційного типу гомогенізатора, було передано на експертне дослідження до випробувальної лабораторії харчової продукції, продовольчої сировини та будівельних матеріалів Запорізької філії випробувального центру «ЗАПОРІЖЖЯСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ». За результатами експертизи встановлено, що питне пастеризоване молоко після пульсаційної гомогенізації відповідає вимогам стандарту ДСТУ 2661-94, затвердженого Наказом Держстандарту України № 79 від 02.08.1999.

Висновки. Сьогодні найбільш поширеним видом обладнання, що застосовується для процесу гомогенізації, є установки з високим енергоспоживанням. У зв'язку із цим особливо актуальним залишається питання розроблення та дослідження енергоощадного технологічного обладнання, здатного забезпечити високу якість продукції за зниження енерговитрат. Згідно з попередніми дослідженнями, перспективним рішенням є використання пульсаційного типу гомогенізатора. Було здійснено теоретичне обґрунтування основних конструктивних параметрів дослідного зразка цього обладнання, у результаті чого визначено, що його продуктивність досягає 1800 кг/год, максимальний тиск становить 1,5 МПа, а встановлена потужність – 2 кВт. Розроблено технічне креслення дослідного зразка пульсаційного типу гомогенізатора, а також визначено базові вимоги до матеріалів для її виготовлення. У подальшому планується виконання експериментальних досліджень, спрямованих на оптимізацію параметрів і режимів функціонування установки з метою досягнення найвищого рівня гомогенізації за мінімальних витрат енергії на різних видах молочної продукції.

Список використаних джерел

1. Samoichuk K., Kovalyov A., Fuchadzhy N., Bezalychna O., Shevtsova A.: Energy Costs Reduction for Dispersion Using a Jet-Slot Type Milk Homogenizer. *Energies* 16(5), 2211 (2023). <https://doi.org/10.3390/en16052211>
2. Drankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR Journal of Engineering*. 2014. Vol. 4, Iss. 5. 8p. URL: [www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue5%20\(part-4\)/A0454_0108.pdf](http://www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue5%20(part-4)/A0454_0108.pdf)
3. Wilbey R.A. Homogenization of Milk: Principles and Mechanism of Homogenization, Effects and Assessment of Efficiency: Valve Homogenizers. *Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition)*. 2011. P. 750–754.
4. Liu C., Li M., Liang C., Wang W. Measurement and analysis of bimodal drop size distribution in a rotor-stator homogenizer. *Chemical Engineering Science*. 2013. Vol. 102. P. 622–631.
5. Håkansson A. Fuchs L. Innings F. Revstedt J. Trägårdh C. & Bergenståhl B. 2011. Turbulent Velocity Fields Measurements of Two Phase Flow in a High Pressure Homogenizer Scale Model. Submitted to journal. 2016. P. 320–342.
6. Innings F., Trägårdh C. Visualization of the Drop Deformation and Break-Up Process in a High Pressure Homogenizer. *Chemical Engineering & Technology*. Volume 28, Issue 8, August, 2015. Pages 882–891. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ceat.200500080>
7. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Івженко А.О., Левченко Л.В. Аналіз конструкцій гомогенізаторів молочної промисловості. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2016. Вип. 16. Т. 1. С. 9–15.
8. Peng J., Dong W., Li L., Xu J., Jin D., Xia X., Liu Y. Effect of high-pressure homogenization preparation on mean globule size and large-diameter tail of oil-in-water injectable emulsions. *Journal of Food and Drug Analysis*. 23, 4, 828–835 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2015.04.004>
9. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Теоретичні дослідження пульсаційної гомогенізації молока. *Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності : матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф., 5–7 вересня 2017 р. Харків : ХДУХТ, 2017. С. 42–43.*



10. Deynichenko G., Samoichuk K., Yudina T., Levchenko L., Palianychka N., Verkholtantseva V., Dmytrevskiy D., Chervonyi V. Parameter optimization of milk pulsation homogenizer. *Journal of Hygienic Engineering and Design*, 2018. Vol. 24. P. 63–67.

11. Самойчук К.О., Кюрчев С.В., Паляничка Н.О., Верхоланцева В.О. Упровадження високоефективного обладнання для диспергування емульсій у технологічну лінію переробки молока. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2022. Вип. 12. Т. 2. С. 7–14.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2025

N. Palianychka, O. Chervotkina, A. Kovalov

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

RESEARCH INTO THE USE OF ENERGY-EFFICIENT EQUIPMENT FOR DISPERSION AT A DAIRY PRODUCTION ENTERPRISE

Summary

The article discusses the study of the implementation of energy-saving equipment for the milk dispersion process. Preliminary analysis has shown that traditional homogenization equipment is characterized by high energy consumption, which is a significant drawback in modern production conditions. Despite this, they remain the dominant solution in production due to the lack of effective alternatives that can provide the proper level of homogenization. In this regard, the task of developing new types of homogenizing equipment that will allow achieving the required degree of dispersion with significantly lower energy costs, as well as analyzing the effectiveness of their use at dairy processing plants, is relevant. During the literature review, a promising type of equipment was identified – a pulsating homogenizer, which is able to effectively disperse the fat phase to sizes that meet technological requirements, while consuming significantly less energy than a traditional valve apparatus. The paper identifies the key design characteristics of the pulsating homogenizer and presents the appearance of the prototype. Experimental tests of a pulsating homogenizer were conducted as part of a production line for the production of pasteurized drinking milk at a dairy processing plant. The results obtained proved that when using a pulsating homogenizer, the average size of fat globules decreased by 19% compared to the valve type. At the same time, a decrease in dispersion was observed, which confirms the effectiveness of the selected parameters and operating modes of the pulsating homogenizer to ensure the stability of the fat phase after homogenization. Pasteurized milk produced using a pulsating homogenizer was transferred for expert examination to the food testing laboratory. According to the results of the examination, it was established that pasteurized drinking milk after pulsating homogenization meets the requirements of the DSTU 2661-94 standard.

Keywords: homogenization, dispersion, milk, pulsating homogenizer, experimental sample, testing, energy saving.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-24>

УДК 621.225.001.4

А. І. Панченко¹, докт. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1230-1463

А. А. Волошина¹, докт. техн. наук

ORCID: 0000-0003-4052-2674

І. А. Панченко¹, інженер

ORCID: 0000-0003-2150-4278

В. Б. Мітков¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3652-0687

А. А. Волошин², викладач спецдисциплін¹ Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного² ВСП «Мелітопольський фаховий коледж ТДАТУ»

e-mail: voloshinaa2012@gmail.com

СТАБІЛІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГІДРОПРИВОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАСИВНИХ ГАСНИКІВ ПУЛЬСАЦІЙ

Анотація. Статтю присвячено вирішенню важливої наукової проблеми забезпечення стабільності динамічних характеристик гідроприводу під час перехідних процесів із застосуванням пасивних гасників пульсацій. У результаті виконаних робіт удосконалено математичну модель, що дає змогу досліджувати вплив пасивного гасника пульсацій на стабілізацію вихідних характеристик гідроприводу. Установлено, що під час розгону гідроприводу амплітуда стрибків тиску і крутного моменту визначається часом відкриття (спрацьовування) запобіжного клапана. Застосування пасивного гасителя пульсацій збільшує час відкриття запобіжного клапана в сім разів, що дає змогу знизити стрибки тиску і крутного моменту в 2,2 рази. Таким чином, застосування пасивного гасника пульсацій, що працює як демпфуючий пристрій, дає змогу стабілізувати динамічні характеристики гідроприводу під час перехідних процесів.

Ключові слова: пасивний гасник пульсацій, структурно-функціональна схема, динамічна модель, динамічні характеристики.

Постановка проблеми. На комунальних, дорожніх, сільськогосподарських, будівельних, лісозаготівельних та інших самохідних машинах [1] широкого застосування набули мехатронні системи з гідравлічним приводом.

Експлуатація гідроприводів супроводжується великими навантаженнями, що викликають коливальні процеси, які впливають на стійкість роботи виконавчих механізмів [2]. Це, своєю чергою, викликає значні пульсації тиску [3] робочої рідини та витрати [4].

Коливальні процеси у виконавчих механізмах викликані відсутністю стабільності динамічних характеристик гідроприводу та виникають у них під час перехідних процесів (розгонів та гальмування). Наявність коливальних процесів негативно впливає на технічний стан і продуктивність гідроприводу, зменшуючи надійність машини загалом [5].

Стабільність зміни динамічних характеристик гідроприводів зумовлена стабільністю вихідних характеристик гідромоторів. Як гідромотори в силових гідроприводах мехатронних систем самохідних машин широко застосовуються героторні [6] і планетарні (орбітальні) гідромотори [7], основним недоліком яких є нестабільність вихідних характеристик [8] під час перехідних процесів [9], що пов'язано з функціональними особливостями планетарних гідромоторів [10; 11]. Ці гідромотори є окремим видом гідромашин, що мають низьку частоту обертання вихідного валу і високий крутний момент [12].

Одним зі шляхів, що забезпечують стабільність вихідних характеристик гідроприводів мехатронних систем самохідної техніки, є застосування пасивних гасників пульсацій, які дають змогу згладжувати сплески тиску робочої рідини, що виникають під час перехідних процесів.

Тому під час проєктування гідроприводів мехатронних систем самохідної техніки найважливішим напрямом є дослідження, спрямовані на забезпечення стабільності вихідних характеристик вихідних ланок гідроприводів (гідромоторів) під час перехідних процесів. У зв'язку із цим питання дослідження впливу функціональних особливостей планетарних гідромоторів на стабілізацію динамічних характеристик гідроприводу під час експлуатації самохідної техніки є актуальним завданням, яке потребує невідкладного вирішення.

Аналіз останніх досліджень. Розглянуто принципи розподілених моделей від 1D до 3D для моделювання витрат у шестеренних насосах [13], а також концепції їх проєктування [14] за допомогою програмного забезпечення SOLIDWORKS [15]. Запропоновано наближену модель, що визначає витратні характеристики шестеренного насоса зовнішнього зачеплення [16] та концепції граничної кривої для шестеренного насоса внутрішнього зачеплення [17], проведено кінематичний аналіз [18], досліджено вплив зазору між зубами на тиск і товщину плівки [19]. Запропоновано теоретичний аналіз [20], проєктування та моделювання зачеплення внутрішнього роторного насоса [21], а також математична модель, що відображає вплив температури робочої рідини на момент тертя [22]. Процеси, що відбувалися в героторних і планетарних (орбітальних) гідромоторах, не розглядалися.

Розроблено геометрію сполучених профілів ротора [23], виконано розрахунок зачеплення [24] циклоїдального насоса. Запропоновано загальну математичну модель зубчастої пари [25], аналітичну модель зносу [26] та прогноуючу модель тертя [27] для героторного насоса, а також метод обчислювальної гідродинаміки (CFD) [28] для дослідження характеристик внутрішнього потоку [29]. Наведено аналіз контактних напруг на обертових елементах героторних насосів [30], досліджено вплив геометрії профілю ротора на продуктивність [31], розроблено імітаційний підхід для визначення втрат потужності [32] та прогнозування аерації та кавітації в героторних насосах [33]. Розроблено засоби автоматизованого контролю роторів героторної гідромашини [34]. Проведено моделювання навантаження у планетарно-роторному насосі [35], досліджено вплив функціональних особливостей систем розподілу на вихідні параметри планетарних гідромашин [36]. Динамічні процеси, що відбуваються в гідравлічних машинах під час експлуатації гідроприводів, не досліджувалися.

Як зазначалося вище, стабільність зміни динамічних характеристик гідроприводів зумовлена стабільністю вихідних характеристик гідромоторів. Установлено, що нестабільність вихідних характеристик гідромоторів планетарного типу зумовлена точністю виготовлення зубчастого профілю системи роторів [10] та коливаннями потоку в системі розподілу робочої рідини [11; 12]. Аналіз статей, що описують дослідження, пов'язані із забезпеченням стабільності зовнішніх характеристик вихідних ланок гідроприводів мехатронних систем самохідних машин під час перехідних процесів, показує, що таких робіт дуже мало [37]. Так само відчувається нестача робіт, що описують дослідження забезпечення стабільності вихідних характеристик гідроприводів мехатронних систем самохідної техніки із застосуванням пасивних гасників пульсацій. Аналіз досліджень, пов'язаних із впливом елементів конструкції планетарних гідромоторів на зміну динамічних характеристик гідроприводів під час їх експлуатації на перехідних процесах показує, що дослідження у цьому напрямі практично відсутні.

Тому дану роботу присвячено вирішенню питань, пов'язаних із дослідженням впливу функціональних особливостей планетарних гідромоторів на стабілізацію динамічних характеристик гідроприводу під час перехідних процесів із застосуванням пасивних гасників пульсацій.

Формулювання мети статті. Для дослідження впливу функціональних особливостей гідромоторів планетарного типу на зміну динамічних процесів, що відбуваються в гідро-

приводах під час перехідних процесів в умовах експлуатації самохідної техніки з використанням пасивного гасителя пульсацій, з метою забезпечення стабілізації цих характеристик необхідно:

- доопрацювати математичну модель, що описує перехідні процеси, які відбуваються в гідроприводах та їхніх елементах, що включає роботу насоса, планетарного гідромотора та запобіжного клапана в умовах експлуатації самохідної техніки, під час підключення пасивного гасника пульсацій;
- дослідити вплив пасивного гасника пульсацій на стабілізацію динамічних процесів, що відбуваються у гідроприводах та їхніх елементах під час перехідних процесів в умовах експлуатації самохідної техніки.

Основна частина. Під час виконання попередніх досліджень було враховано вплив конструктивних особливостей системи роторів [10] та розподільної системи [11] планетарного гідромотора, а також зовнішніх впливів, що обурюють (пульсацій подачі насоса і коливань навантаження), на зміну вихідних характеристик гідроприводу самохідної техніки [12].

Відомо [10–12], що коливання потоку робочої рідини в гідроприводах мехатронних систем, які зумовлені перехідними процесами (розгін, гальмування), викликають значні сплески тиску, що призводять до руйнівного впливу механізму приводу самохідної техніки у цілому. Одним з ефективних шляхів зниження руйнівних стрибків тиску, зумовлених перехідними процесами, що виникають під час роботи гідроприводу під навантаженням, є застосування пасивного гасника пульсацій.

На підставі універсальної моделі мехатронної системи з гідравлічним приводом [38] запропоновано доопрацьовану математичну модель, що описує перехідні процеси, які відбуваються в гідроприводах та їхніх елементах, в умовах експлуатації самохідної техніки [39] під час підключення пасивного гасника пульсацій [40]. Допрацьована модель дає змогу досліджувати роботу насоса, планетарного гідромотора та запобіжного клапана в експлуатаційних умовах із використанням пасивного гасителя пульсацій, яку можна представити системою рівнянь:

$$Q_{zm}(t) = Q_n(t) - Q_{kl}(t), \quad (1)$$

$$Q_n(t) = \frac{V_n}{2\pi} \cdot \omega_n(t) \cdot e - C_{n,y} \cdot [p_{nagH}(t) - p_{op}] - C_{n,n} \cdot [p_{nagH}(t) - p_{вс}] - C_n \cdot \frac{\omega_n(t)}{E_{жс}} \cdot [p_{nagH}(t) - p_{зл}] - \frac{(V_n + V_{n,z,n})}{E_{жс}} \frac{dp_{nagH}(t)}{dt}, \quad (2)$$

$$Q_{kl}(t) = \mu \cdot \pi \cdot d_n \cdot x(t) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} [p_{nagH}(t) - p_{зл}]}, \quad (3)$$

$$Q_{zm}(t) = \frac{V_{zm}}{2\pi} \cdot \omega_{zm}(t) + C_{zm,y} \cdot p_{nagH}(t) + C_{zm,n} \cdot [p_{nagH}(t) - p_{зл}(t)] + C_{zm} \cdot \frac{\omega_{zm}(t)}{E_{жс}} \cdot [p_{nagH}(t) - p_{зл}] + \frac{V_{zm}}{E_{жс}} \frac{dp_{nagH}(t)}{dt}, \quad (4)$$

$$Q_{zm}(t) = \mu \cdot A_i(t) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} [p_{nagH}(t) - p_{зл}]}, \quad (5)$$

$$A_i(t) = \sum_{i=1}^Z \left(\frac{\pi}{Z_2} - \Delta - |\beta_i - \alpha_i(t)| \right) \cdot \frac{(R_2^{02} - R_1^{02})}{2}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp_{нагн}(t)}{dt} = & \frac{E_{жс}}{(V_n + V_{зм} + V_{п.з.п})} \cdot \left\{ \frac{V_n}{2\pi} \cdot \omega_n(t) \cdot e - \frac{V_{зм}}{2\pi} \cdot \omega_{зм}(t) - \right. \\ & - C_{н.у} \cdot [p_{нагн}(t) - p_{др}] - C_{н.п} \cdot [p_{нагн}(t) - p_{вс}] - C_{зм.у} \cdot p_{нагн}(t) - \\ & - C_{зм.п} \cdot [p_1(t) - p_{зл}] - \frac{1}{E_{жс}} \cdot [C_n \cdot \omega_n(t) + C_{зм} \cdot \omega_{зм}(t)] \times \\ & \times [p_{нагн}(t) - p_{зл}] - \mu \cdot \pi \cdot d_n \cdot x(t) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} [p_{нагн}(t) - p_{зл}]} - A_{пл} \frac{dx}{dt} \Bigg\}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} M_{кр} &= M_j + M_c, \\ M_{кр} &= 2 \left(e' \pm \frac{(G_t \pm E)}{2} \right) \cdot \Delta p \cdot b \cdot (z_1 + 1) \cdot h_i, \\ M_j &= J \cdot \frac{d\omega_{зм}(t)}{dt}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{d\omega_{зм}(t)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot \left[\frac{V_{зм}}{2\pi} \cdot \eta_{з.м} \cdot [p_{нагн}(t) - p_{зл}] - M_c \right], \quad (9)$$

$$Q_n(t) = Q_\omega \cdot \sin \omega(t) + Q_\omega \cdot \sin \omega(t - \tau), \quad (10)$$

$$M_c(t) = M_t(t) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + M_\omega \cdot \sin \omega(t), \quad (11)$$

$$\eta_m = \frac{2 \left(e \pm \frac{(S_T \pm P_\phi)}{2} \right) \cdot b \cdot (z_1 + 1) \cdot h_i}{V_{зм0}} \quad (12)$$

де Q_n – подача насоса; $Q_{кл}$ – витрата робочої рідини через запобіжний клапан; $Q_{зм}$ – витрата гідромотора; $V_n, V_{зм}$ – робочі об'єми насоса та гідромотора; $V_{п.з.п}$ – об'єм пасивного гасника пульсацій; $\omega_n, \omega_{зм}$ – кутові швидкості валів насоса та гідромотора; $C_{н.у}, C_{зм.у}$ – коефіцієнти витоку в насосі та гідромоторі; $C_{н.п}, C_{зм.п}$ – коефіцієнти перетікань у насосі та гідромоторі; $C_n, C_{зм}$ – коефіцієнти пропорційності в насосі та гідромоторі; e – параметр регулювання; $p_{нагн}, p_{зл}, p_{вс}, p_{др}$ – тиски нагнітання, зливу, всмоктування та дренажу відповідно; Δp – перепад тиску робочої рідини у гідромоторі; $\eta_{з.м}$ – механічний ККД гідромотора; ρ – густина робочої рідини; μ – коефіцієнт витрати; $E_{жс}$ – об'ємний модуль пружності робочої рідини; d_n – діаметр плунжера; x – переміщення плунжера; $A_{пл}$ – ефективна площа плунжера; A_i – площа прохідного перерізу розподільчої системи; $M_{кр}, M_j, M_c$ – моменти крутний, інерції та опору відповідно; e' – міжцентрова відстань між внутрішнім та зовнішнім роторами; G_t – технологічний зазор між зубами роторів; E – похибка форми зубчастого контуру роторів; b – ширина роторів; z_1 – кількість зубів внутрішнього ротора; J – момент інерції мас, що обертаються.

Отримана уточнена математична модель дає змогу використовувати її для моделювання динамічних процесів, що протікають у гідроприводі в експлуатаційних умовах під час використання пасивного гасителя пульсацій.

Дослідження характеру зміни вихідних характеристик гідроприводу з планетарним гідромотором проводилися на ПЕОМ за допомогою пакету імітаційного моделювання VisSim.

Під час досліджень гідроагрегату прийнято такі вихідні дані та початкові умови [10; 11; 39; 40]:

- *насос*: геометрична подача насоса постійна та дорівнює $Q_{н,г}(t)$ $см^3/с$; кутова швидкість валу насоса дорівнює $\omega_n = 125$ $с^{-1}$; для нерегульованого насоса параметр регулювання дорівнює $e = 1$; тиск у зливній магістралі дорівнює $p_{зл} = 0$;
- *гідромотор*: робочий об'єм гідромотора дорівнює $V_{зм0} = 160$ $см^3$; момент опору постійний і дорівнює $M_c = 365$ $Н\cdot м$; момент інерції обертових мас дорівнює $J = 3,6$ $Н\cdot м$; об'ємний ККД гідромотора – $\eta_{об} = 0,95$; гідромеханічний ККД гідромотора – $\eta_{г.м} = 0,9$;
- *клапан*: жорсткість пружини дорівнює $C = 200$ $Н/см$; величина попереднього стиснення пружини $x_0 = 0,125$ $см$; позитивне перекриття щілини дорівнює $x_z = 0,53$ $см$.
- *клапан*: жорсткість пружини рівна $C=200Н/см$; величина попереднього сжимання пружини – $x_0 = 0,125$ $см$; позитивне перекриття щілини – $x_z = 0,53$ $см$.

На рис. 1 представлено структурно-функціональну схему математичної моделі гідроприводу з планетарним гідромотором з урахуванням конструктивних особливостей його системи роторів та розподільчої системи, а також зовнішніх впливів, що дає змогу досліджувати динаміку зміни вихідних характеристик гідроприводу під час експлуатації самохідної техніки.

Вихідні дані задані блоком 1. Відомо [39; 40], що у процесі експлуатації подача насоса та навантаження нерівномірні. Моделювання нерівномірності подачі насоса, задане блоком 2 (рис. 1), здійснювалося шляхом підсумовування напівсинусоїд із тимчасовим усуненням, що описано рівнянням (10), а моделювання зміни навантаження, задане блоком 3 (рис. 1), здійснювалося через момент опору, який змінюється за експоненціальним і синусоїдальним законами, що описано рівнянням (11). Зміна площі прохідного перерізу розподільної системи планетарного гідромотора, описане виразом (5), представлено блоком 4 (рис. 1). Зміна об'ємних утрат торцевої розподільної системи з урахуванням її конструктивних особливостей, описано виразом (4), представлено блоком 5. Зміна механічного ККД з урахуванням конструктивних особливостей (похибки форми) системи роторів, описане виразом (12), представлено блоком 6 (рис. 1). Зміна тиску в гідросистемі з урахуванням зміни площі прохідного перерізу розподільної системи, описане виразом (7), представлено блоком 8. Зміна витрати робочої рідини з урахуванням конструктивних особливостей системи роторів та розподільної системи, описана рівняннями (5) і (6), представлено блоком 4 (рис. 1). Блок 11 дає змогу вивести на екран графічні залежності тиску в гідросистемі, моментів опору, крутного та інерційного, кутової швидкості та частоти обертання валу гідромотора, а також витрат через запобіжний клапан та гідромотор з урахуванням конструктивних особливостей системи роторів та розподільної системи за різних умов експлуатації та в будь-який момент часу.

Попередніми дослідженнями [12; 40] встановлено, що процес розгону гідроприводу можна розділити на три етапи: пуск валу гідромотора (час відкривання запобіжного клапана), розгін (час закривання запобіжного клапана) і сталий рух. Також встановлено, що для гідроприводів із планетарними гідромоторами серії PRG-22 за номінальної витрати 100 $л/хв$ і пускового моменту M_n , що дорівнює 0,9 від номінального значення M_n (тобто $M_n = 0,9 M_n$) об'єм пасивного гасителя пульсацій повинен становити не менше 5000 $см^3$.

Моделювання перехідних процесів відбувалося в гідроприводі з планетарним гідромотором, із робочим об'ємом 160 $см^3$. Досліджено одночасний вплив конструктивних особливостей системи роторів (зміна діаметрального зазору силового з'єднання) та розподільної системи (зміна площі прохідного перерізу) на динамічні характеристики гідроприводу в умовах експлуатації самохідної техніки. Експлуатаційні умови моделювалися зміною зовнішніх впливів, що обурюють: моменту опору та пульсації подачі насоса. Дослідження динамічних процесів, що відбуваються в гідроприводах під час перехідних процесів в умовах експлуатації самохідної техніки, проводилися під час використання пасивного гасителя пульсацій.

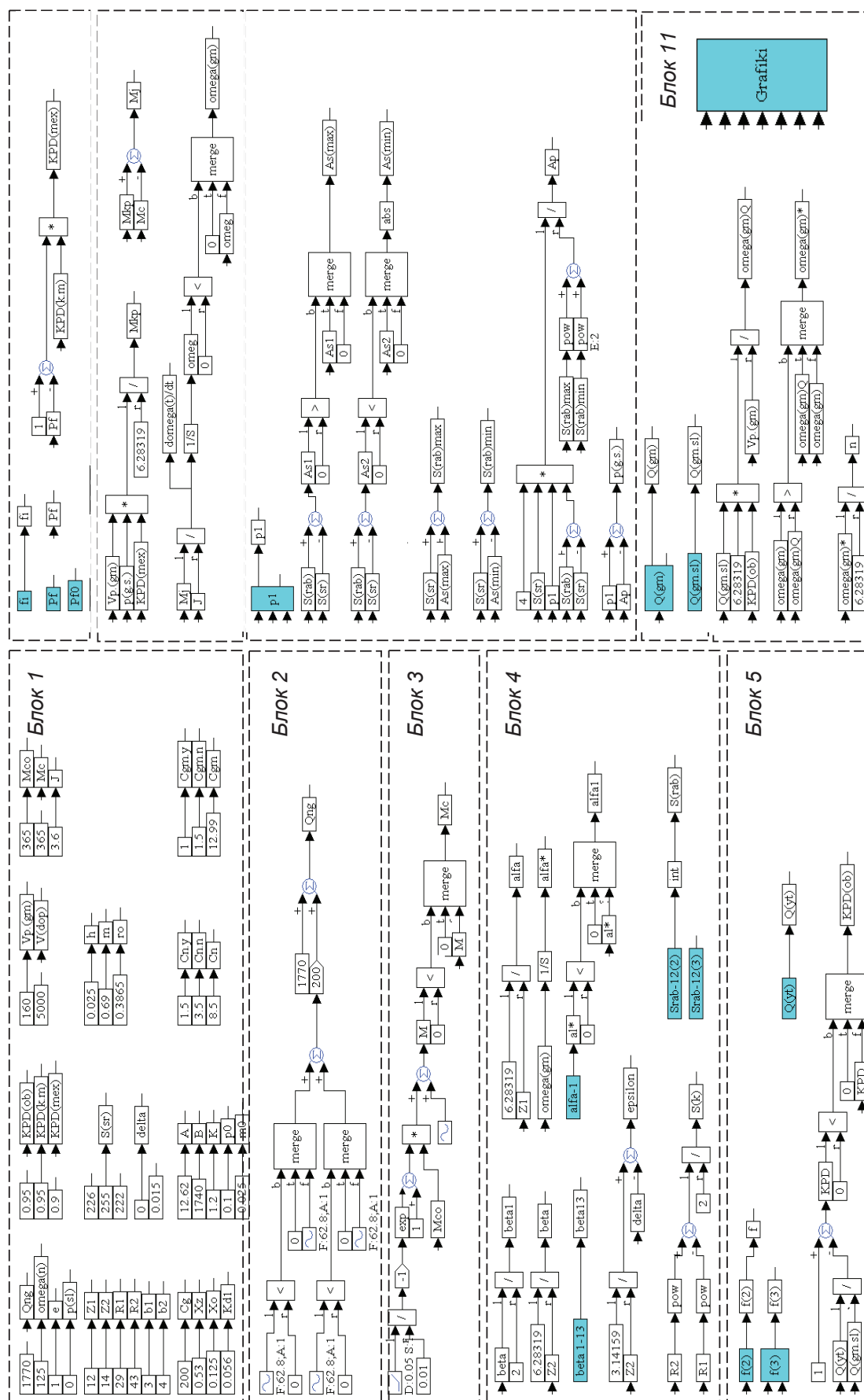


Рис. 1. Структурно-функціональна схема динамічної моделі гідроприводу із планетарним гідромотором

У результаті досліджень установлено, що підключення до гідравлічної схеми пасивного гасника пульсацій збільшує час пуску та розгону гідромотора та визначається часом спрацювання запобіжного клапана (рис. 2, крива 3).

Для першого етапу (пуск) це становить $0...0,03$ с – без пасивного гасника пульсацій (рис. 2, а, крива 3) та $0...0,11$ с – із пасивним гасителем пульсацій (рис. 2, б, крива 3), а для другого етапу (розгін) це становить $0,03...0,78$ та $0,11...0,95$ с відповідно. Збільшення часу пуску гідромотора з $0,03$ с до $0,11$ с пояснюється демпфіруючими властивостями гасителя пульсацій.

Аналіз залежності зміни тиску на вході в гідромотор під час розгону гідроприводу показує, що в момент пуску валу гідромотора (перший етап) спостерігається великий стрибок тиску до 85 МПа (рис. 2, а, крива 1) для гідроприводу без гасителя пульсацій.

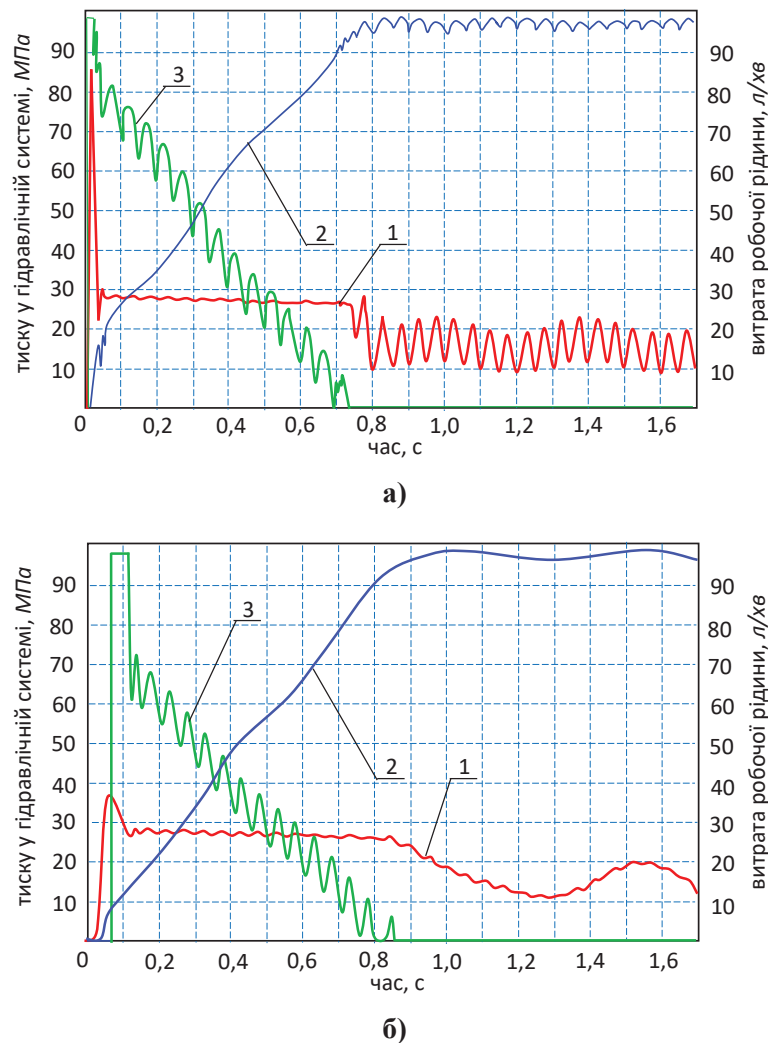


Рис. 2. Залежність зміни входних параметрів гідромотора під час розгону гідроприводу в умовах експлуатації самохідної техніки:

- а) – без пасивного гасника пульсацій; б) – із пасивним гасником пульсацій;**
1 – тиск у гідравлічній системі; 2 – витрати робочої рідини через гідромотор;
3 – витрати робочої рідини через запобіжний клапан

Для гідроприводу з гасителем пульсацій цей стрибок тиску становить до 38 МПа (рис. 2, б, крива 1). У момент максимального стрибка тиску для обох випадків, запобіжний клапан повністю відкритий і через нього проходить 98% робочої рідини (рис. 2, криві 2).



Під час розгону гідромотора (другий етап) тиск різко знижується до 29 МПа і поступово зменшується до 27 МПа з невеликою амплітудою коливань до 4 МПа для обох схем (рис. 2). Різке падіння тиску за обох схем пояснюється повним відкриттям запобіжного клапана (рис. 2, криві 2).

Рух валу гідромотора (третій етап), що встановився, характеризується стабілізацією тиску, який досягає свого номінального значення 16 МПа (рис. 2, крива 1). Необхідно відзначити, що на ділянці, що розглядається, для гідроприводу без пасивного гасителя пульсацій спостерігаються значні пульсації тиску до 10 МПа (рис. 2, а, крива 1), викликані коливаннями зовнішнього навантаження, а також яскраво виражені синусоїдальні обурення, викликані нерівномірністю подачі насоса.

Аналіз витрати робочої рідини, що проходить через гідромотор (на третьому етапі), для гідроприводу без гасника пульсацій (рис. 2, а, крива 2) показує, що на досліджуваній ділянці спостерігаються незначні коливання $2...3 \text{ л/хв}$, викликані коливаннями зовнішнього навантаження. Використання пасивного гасника пульсацій дає змогу згладити негативні пульсації (рис. 2, б, крива 2).

Аналіз залежності зміни крутного моменту показує (рис. 3, крива 1), що в момент страгування валу гідромотора (перший етап) спостерігається великий стрибок крутного моменту до $1900 \text{ Н}\cdot\text{м}$ для гідроприводу без пасивного гасника пульсацій (рис. 3, а, крива 1). Для гідроприводу з гасителем пульсацій цей стрибок досягає $900 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (рис. 3, б, крива 1).

Під час розгону гідромотора (другий етап) крутний момент різко падає для обох аналізованих гідралічних схем до $640 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а потім поступово зменшується до $620 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (рис. 3, криві 1).

Сталий рух валу гідромотора (третій етап) характеризується стабілізацією крутного моменту, який досягає свого номінального значення $385 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (рис. 3, крива 1). Необхідно відзначити, що на ділянці, що розглядається, для гідроприводу без пасивного гасителя пульсацій спостерігаються значні пульсації крутного моменту валу гідромотора до $250 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (рис. 3, а, крива 1). Ці коливання спричинені нерівномірністю зовнішнього навантаження, а синусоїдальні обурення спричинені нерівномірністю подачі насоса.

Аналіз залежностей зміни частоти обертання валу гідромотора для гідроприводу без гасника пульсацій показує (рис. 3, а, крива 2), що на досліджуваній ділянці спостерігаються незначні коливання $5...8 \text{ хв}^{-1}$. Ці коливання викликані змінами зовнішнього навантаження. Зазначені коливання стабілізуються (згладжуються) застосуванням пасивного гасника пульсацій (рис. 3, б, крива 2).

Необхідно відзначити, що під час розгону гідроприводу величина (амплітуда) стрибків тиску і крутного моменту визначається часом відкриття (спрацьовування) запобіжного клапана.

Використання в гідралічних приводах мехатронних систем самохідної техніки пасивного гасника пульсацій дає змогу в момент пуску знизити стрибки тиску і крутного моменту в 2,2 рази. При цьому час спрацьовування (відкриття) запобіжного клапана збільшується у сім разів, із $0,01 \text{ с}$ до $0,07 \text{ с}$ (рис. 2, криві 3).

За сталого режиму роботи гаситель пульсацій стабілізує (згладжує) пульсації, викликані коливаннями зовнішнього збурюючого навантаження (крутного моменту), а також коливання, викликані нерівномірністю подачі насоса.

Таким чином, застосування пасивного гасника пульсацій, що працює як демпфуючий пристрій, дає змогу стабілізувати динамічні характеристики гідроприводу під час перехідних процесів.

Висновки. У результаті проведених досліджень отримано такі основні результати:

1. Доопрацьовано математичну модель, що описує перехідні процеси, які відбуваються в гідроприводах та їхніх елементах, що включає роботу насоса, планетарного гідромотора та

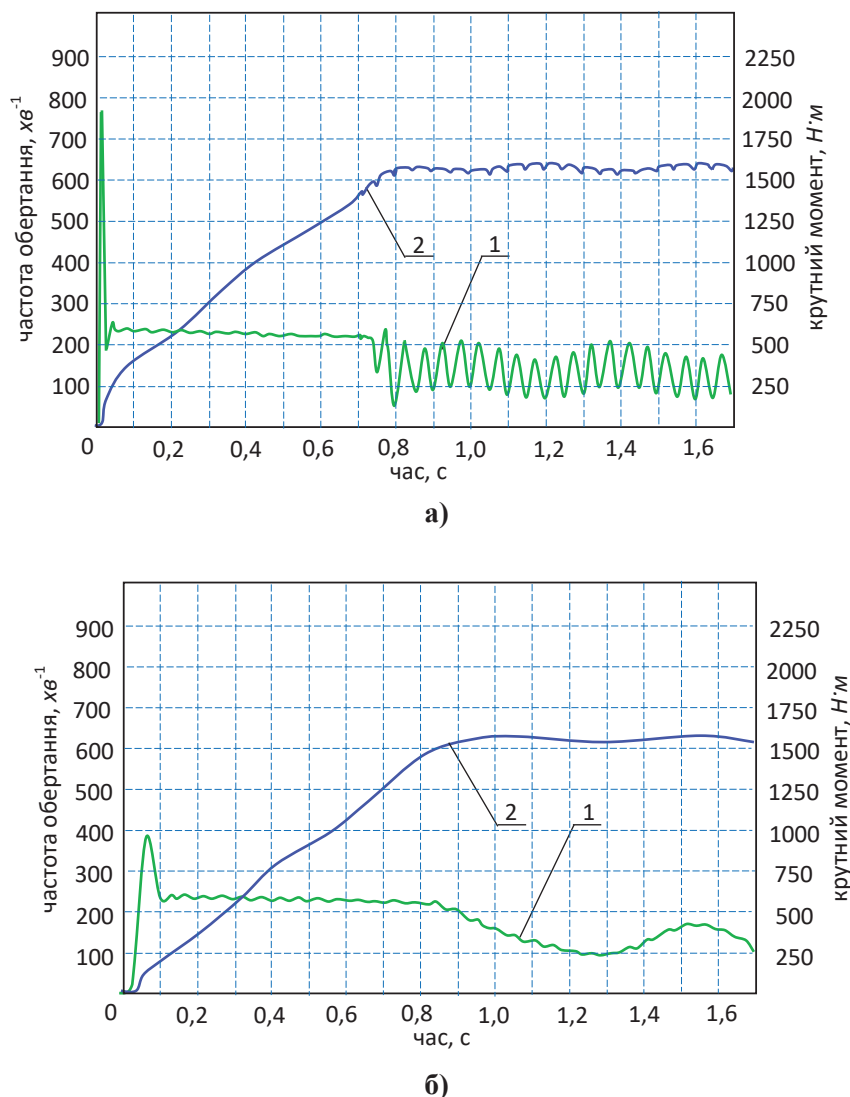


Рис. 3. Залежність зміни вихідних параметрів на валу гідромотора під час розгону гідроприводу в умовах експлуатації самохідної техніки:
а) – без пасивного гасника пульсацій; б) – із пасивним гасителем пульсацій;
1 – крутний момент; 2 – частота обертання

запобіжного клапана в умовах експлуатації самохідної техніки, за підключення пасивного гасника пульсацій.

2. Допрацьована модель дає змогу досліджувати вплив пасивного гасника пульсацій на стабілізацію динамічних процесів, що відбуваються у гідроприводі з планетарним гідромотором під час перехідних процесів в умовах експлуатації самохідної техніки.

3. Установлено, що під час розгону гідроприводу величина (амплітуда) стрибків тиску і крутного моменту визначається часом відкриття (спрацьовування) запобіжного клапана. Застосування пасивного гасителя пульсацій збільшує час спрацьовування (відкриття) запобіжного клапана у сім разів, із 0,01 с до 0,07 с. Це дає змогу в момент пуску гідравлічного приводу мехатронної системи самохідної техніки знизити стрибки тиску і крутного моменту в 2,2 рази. За сталого режиму роботи гаситель пульсацій стабілізує (згладжує) пульсації викликані коливаннями зовнішнього збурюючого навантаження, а також коливання, викликані нерівномірністю подачі насоса.



4. Застосування пасивного гасителя пульсацій, що працює як демпфуючий пристрій, дає змогу стабілізувати динамічні процеси, що відбуваються у гідроприводах та їхніх елементах під час перехідних процесів, а також сталого режиму роботи в процесі експлуатації самохідної техніки.

Список використаних джерел

1. Ivanovs S., Bulgakov V., Adamchuk V., Kyurchev V., Kuvachov V.: Experimental research on the movement stability of a ploughing aggregate, composed according to the push-pull scheme. *INMATEH – Agricultural Engineering* 56(3), 9–16 (2018).
2. Hsieh C.F.: Flow characteristics of gerotor pumps with novel variable clearance designs. *Journal of Fluids Engineering* 137 (4), 041107 (2015). <https://doi.org/10.1115/1.4029274>
3. Sung H.-J., Min H.-K., Nam Y.-J., Park M.-K.: Design and experimental verification of a port plate in a gerotor pump to reduce pressure pulsation. *Journal of Mechanical Science and Technology* 32, 671–678 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0114-4>
4. Kim S.-Y., Nam Y.-J., Park M.-K.: Design of port plate in gerotor pump for reduction of pressure pulsation. *Journal of Mechanical Science and Technology* 20 (10), 1626–1637 (2006). <https://doi.org/10.1007/BF02916266>
5. Панченко А.І., Волошина А.А., Золотарьов О.Ю., Тітов Д.С. Перспективи гідрофікації мобільної сільськогосподарської техніки. *Промислова гідраліка і пневматика*. 2004. № 1. С. 71–74.
6. Gamez-Montero P., Castilla R., Codina E., Freire J., Morató J., Sanchez-Casas, E., Flotats, I.: GeroMAG: In-House Prototype of an Innovative Sealed, Compact and Non-Shaft-Driven Gerotor Pump with Magnetically-Driving Outer Rotor. *Energies* 10, 435 (2017). <https://doi.org/10.3390/en10040435>
7. Choi T.H., Kim M.S., Lee G.S., and others: Design of rotor for internal gear pump using cycloid and circular-arc curves. *Journal Mechanical Design* 134 (1), 011005 (2012), <https://doi.org/10.1115/1.4004423>
8. Liu H., Lee J.-C., Yoon A., Kim S.-T.: Profile design and numerical calculation of instantaneous flow rate of a gerotor pump. *Journal of Applied Mathematics and Physics* 3 (1), 92–97 (2015), <https://doi.org/10.4236/jamp.2015.31013>
9. Hsieh C.F.: Fluid and dynamics analyses of a gerotor pump using various span angle Designs. *Journal Mechanical Design* 134 (12), 121003 (2012), <https://doi.org/10.1115/1.4007703>
10. Панченко А.І., Волошина А.А., Панченко І.А., Волошин А.А. Дослідження динамічних характеристик мехатронних систем з гідравлічним приводом. *Праці ТДАТУ*. 2020. Вип. 20. Т. 4. С. 58–72. DOI:10.31388/2078-0877-2020-20-4-58-72
11. Панченко А.І., Волошина А.А., Мітков В.Б., Панченко І.А., Нестеренко К.В. Динаміка зміни вихідних характеристик мехатронних систем з планетарними гідромоторами. *Праці ТДАТУ*. 2021. Вип. 21. Т. 4. С. 28–41. DOI:10.31388/2078-0877-2021-21-2-28-41
12. Panchenko A., Voloshina A., Sadullozoda S.S., Boltyansky O., Panina V.: Influence of the Design Features of Orbital Hydraulic Motors on the Change in the Dynamic Characteristics of Hydraulic Drives. *DSMIE 2022: Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. LNME*. Springer, Cham, 2, 101–111 (2022). https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_10
13. Rundo M.: Models for flow rate simulation in gear pumps: A review. *Energies* 10, 1261 (2017). <https://doi.org/10.3390/en10091261>
14. Devendran S., Vacca A.: A Novel Concept for a Variable Delivery External Gear Machine. In *Proceedings of the 14th Scandinavian International Conference on Fluid Power*, Tampere, Finland, 20–22 May 2015. <https://doi.org/10.1080/14399776.2014.977699>
15. Hemanth R.: Design Modeling and Analysis of a Gear Pump for Dispensing Application. *Appl. Mech. Mater.* 592–594, 1035–1039 (2014)
16. Kim J.H., Kim S.G.: The Flow Rate Characteristics of External Gear Pump for EHPS. In *Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*, Bangkok, Thailand, 29–31 January 2013. <https://doi.org/10.1109/ISMS.2013.113>
17. Mimmi, G.C., Pennacchi P.E.: Non-undercutting conditions in internal gears. *Mech. Mach. Theory* 35, 477–490 (2000). [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(99\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(99)00028-2)

18. Paffoni B.: Pressure and film thickness in a trochoidal hydrostatic gear pump. *Proc. Inst. Mech. Eng. G* 217, 179–187 (2003). <https://doi.org/10.1243/095441003769700744>
19. Paffoni B., Progridi, R., Gras R.: Teeth clearance effects upon pressure and film thickness in a trochoidal hydrostatic gear pump. *Proc. Inst. Mech. Eng. G* 218, 247–256 (2004). <https://doi.org/10.1243/0954410041872799>
20. Bonandrini G., Mimmi G., Rottenbacher C.: Theoretical Analysis of an Original Rotary Machine. *J. Mech. Des.* 132 (2), 024501 (2010). <https://doi.org/10.1115/1.4000698>
21. Bonandrini G., Mimmi G., Rottenbacher C.: Design and simulation of meshing of a particular internal rotary pump. *Mech. Mach. Theory* 49, 104–116 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.11.001>
22. Inaguma Y.: Friction torque characteristics of an internal gear pump. *Proc. Inst. Mech. Eng. C* 225, 1523–1534 (2011). <https://doi.org/10.1177/0954406211399659>
23. Vecchiato D., Demenego A., Argyris J., Litvin F.L.: Geometry of a cycloidal pump. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 190, 2309–2330 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(00\)00236-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(00)00236-X)
24. Demenego A., Vecchiato D., Litvin F.L., Nervegna N., Mancó S.: Design and simulation of meshing of a cycloidal pump. *Mech. Mach. Theory* 37, 311–332 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(01\)00074-X](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(01)00074-X)
25. Ivanovic' L., Devedžić' G., Čuković' S., Mirić' N.: Modeling of the Meshing of Trochoidal Profiles with Clearances. *J. Mech. Des.* 134 (4), 041003 (2012). <https://doi.org/10.1115/1.4005621>
26. Kwon S.-M., Kim C.-H., Shin J.-H.: Analytical wear model of a gerotor pump without hydrodynamic effect. *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.* 2, 230–237 (2008). <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2.230>
27. Harrison J., Aihara R., Eisele F.: Modeling Gerotor Oil Pumps in 1D to Predict Performance with Known Operating Clearances. *SAE Int. J. Engines* 9, 1839–1846 (2016). <https://doi.org/10.4271/2016-01-1081>
28. Ham J., Kim S., Oh J., Cho H.: Theoretical investigation of the effect of a relief groove on the performance of a gerotor oil pump. *J. Mech. Sci. Technol.* 32, 3687–3698 (2018).
29. Bae J., Kwak H., San S., Kim C.: Design and CFD analysis of gerotor with multiple profiles (ellipse–involute–ellipse type and 3-ellipses type) using rotation and translation algorithm. *Proc. IMechE Part C* 230, 804–823 (2016). <https://doi.org/10.1177/0954406215583888>
30. Ivanovic' L., Rakic' B., Stojanovic' B., Matejic' M.: Comparative analysis of analytical and numerical calculations of contact stresses at rotational elements of gerotor pumps. *Appl. Eng. Lett.* 1, 1–7 (2016)
31. Jacazio G., De Martin A.: Influence of rotor profile geometry on the performance of an original low-pressure gerotor pump. *Mech. Mach. Theory* 100, 296–312 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.02.012>
32. Pellegrini M., Vacca A.: A simulation approach for the evaluation of power losses in the axial gap of gerotor units. In *Proceedings of the 10th JFPS International Symposium on Fluid Power*, Fukuoka, Japan, 24–27 October 2017. <https://doi.org/10.5739/jfpsij.11.55>
33. Shah Y.G., Vacca A., Dabiri S., Frosina E.: A fast lumped parameter approach for the prediction of both aeration and cavitation in Gerotor pumps. *Meccanica* 53, 175–191 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11012-017-0725-y>
34. Kiurchev S., Abdullo M.A., Vlasenko T., Prasol S., Verkholtantseva V.: Automated Control of the Gear Profile for the Gerotor Hydraulic Machine. *InterPartner 2022: Advanced Manufacturing Processes IV. LNME*, pp. 32–43, Springer, Cham (2022). https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_4
35. Ivanovic' L., Ilic' A., Miloradovic' D., Josifovic' D.: Modelling and simulation of the load in the epicyclic rotary pump with trochoidal gear profiles. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 393, 1–9 (2018). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012049>
36. Kiurchev S., Luzan P., Zasiadko A., Radionov H., Boltianska N. Influence of the flow area of distribution systems on changing the operating parameters of planetary hydraulic motors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1021, 012037 (2021). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012037>
37. Gamez-Montero P., Codina E., Castilla R.: A Review of Gerotor Technology in Hydraulic Machines. *Energies* 12, 2423 (2019), <https://doi.org/10.3390/en12122423>
38. Панченко А.І., Волошина А.А., Панченко І.А., Волошин А.А. Модель гідравлічного приводу мехатронної системи. *Праці ТДАТУ*. 2018. Вип. 18. Т. 2. С. 59–83. DOI: 10.31388/2078-0877-18-2-58-82
39. Panchenko A., Voloshina A., Fatyeyev A., Tynyanova I. and Mudryk K. Stabilization of the Transient Dynamic Characteristics for a Hydraulic Drive with a Planetary Hydraulic Motor. *DSMIE 2023: Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. LNME*. Springer, Cham, 2, 95–105 (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-32774-2_10



40. Панченко А.І., Волошина А.А., Мітков В.Б., Волошин А.А. Вплив конструктивних особливостей планетарних гідромоторів на зміну динамічних характеристик гідроприводів мехатронних систем самохідної техніки. *Праці ТДАТУ*. 2023. Вип. 23. Т. 1. С. 6–26. DOI:10.31388/2078-0877-2023-23-1-6-26

Стаття надійшла до редакції 07.04.2025

A. Panchenko¹, A. Voloshina¹, I. Panchenko¹, V. Mitkov¹, A. Voloshin²

¹ *Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

² *Melitopol Vocational College of TSATU*

STABILIZATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A HYDRAULIC DRIVE USING PASSIVE PULSATION DAMPERS

Summary

One of the ways to ensure the stability of the output characteristics of hydraulic drives of mechatronic systems of self-propelled vehicles is the use of passive pulsation dampers, which allow smoothing out the pressure surges of the working fluid that occur during transient processes. As a result of the research, a mathematical model has been refined that describes the transient processes that occur in hydraulic drives and their elements, which includes the operation of the pump, planetary hydraulic motor and safety valve in the conditions of operation of self-propelled vehicles, when a passive pulsation damper is connected. The refined model allows us to study the influence of a passive pulsation damper on the stabilization of dynamic processes that occur in a hydraulic drive with a planetary hydraulic motor during transient processes in the conditions of operation of self-propelled vehicles. It has been established that when the hydraulic drive is accelerated, the magnitude of pressure and torque surges are determined by the opening time of the safety valve. The use of a passive pulsation damper increases the operating time (opening) of the safety valve by 7 times from 0.01 s to 0.07 s. This allows, at the moment of starting the hydraulic drive of the mechatronic system of self-propelled equipment, to reduce pressure and torque jumps by 2.2 times. In a stable operating mode, the pulsation damper stabilizes pulsations caused by fluctuations in the external disturbing load, as well as fluctuations caused by uneven pump supply. The use of a passive pulsation damper, which works as a damping device, allows stabilizing the dynamic processes occurring in hydraulic drives and their elements during transient processes, as well as in a stable operating mode during the operation of self-propelled equipment.

Keywords: passive pulsation damper, structural and functional diagram, dynamic model, dynamic characteristics.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-25>

УДК 637.134

К. О. Самойчук¹, докт. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3423-3510

Є. Р. Прісс¹, аспірант

ORCID: 0009-0000-4376-0198

¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: kyrylo.samoichuk@tsatu.edu.ua

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ РОТОРНИХ ДИСПЕРГАТОРІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ГОМОГЕННИХ БІЛКОВИХ СТРУКТУР

Анотація. У галузевому машинобудуванні одними з важливих напрямів є розроблення та впровадження обладнання технологічних ліній виробництва кисломолочної продукції. Операція надання гомогенної структури після ферментації кисломолочних продуктів є ключовим процесом у виробництві перемішаного або питного кисломолочного продукту, такого, наприклад, як перемішаний або питний йогурт. Типові конструкції для здійснення такої операції є неефективними: мають низьку продуктивність та високі енерговитрати. Із метою підвищення енергоефективності та якості процесів виготовлення кисломолочних продуктів необхідно розробити ефективну конструкцію роторного диспергатора, який буде відповідати сучасним умовам концентратного виробництва, тобто за невеликих габаритів, маси, вартості та простоти обслуговування будуть мати низькі енерговитрати, високу продуктивність, універсальність та високу якість обробки.

Ключові слова: білкові структури, кисломолочні продукти, денатурація білків, диспергатор, роторно-пульсаційний апарат.

Постановка проблеми. У сучасній харчовій технології зростає інтерес до модифікації білкових структур задля покращення функціональних властивостей харчових систем. Однією з перспективних технологічних операцій є створення гомогенних білкових структур (білкових молекул) – контрольоване розтягування та деформація білків на молекулярному рівні. Цей підхід набув актуальності у виробництві кисломолочної продукції, де він застосовується для покращення текстурних, реологічних та органолептичних характеристик кінцевого продукту [1].

Операція надання гомогенної структури після ферментації кисломолочних продуктів є ключовим процесом у виробництві перемішаного або питного кисломолочного продукту, такого, наприклад, як перемішаний або питний йогурт. Ця операція зазвичай виконується за допомогою фільтрів чи клапанних (щілинних) пристроїв, які створюють інтенсивні механічні зусилля у вигляді зсувного, турбулентного та вібраційного навантаження [2]. Такі умови сприяють розгортанню нативної конформації білкових молекул, зокрема казеїнів та сироваткових білків, і дають змогу перетворювати їх на більш лінійні або орієнтовані структури. У результаті формується щільніша та стабільніша гелева матриця, що позитивно впливає на консистенцію, стабільність та вологозв'язувальну здатність кисломолочних продуктів

Тема даної роботи відноситься до способу виробництва перемішаного або питного кисломолочного продукту або свіжого сиру, що включає після стадії ферментації стадію розкладження білкових молекул. Цей етап виконується роторним диспергатором, що включає кільцеподібний ротор та кільцеподібний статор [3].

Сьогодні відомо багато різних конструкцій роторних диспергаторів-гомогенізаторів, які відрізняються робочими органами, наявністю чи відсутністю насосного ефекту, ступенем кавітаційних ефектів і т. д. Але не всі вони придатні для створення гомогенних білкових структур кисломолочних продуктів.

Аналіз останніх досліджень. Фізико-хімічна суть впливу на білкові структури полягає у частковому руйнуванні слабких міжмолекулярних взаємодій (водневих зв'язків, гідрофобних іонних взаємодій) за збереження ковалентного скелета поліпептиду [4]. Це дає змогу уникати повної денатурації білка, забезпечуючи високу функціональну активність після механічної обробки. Дослідження свідчать, що застосування роторно-пульсаційних апаратів для стретчингу білків сприяє підвищенню в'язкості на 20–35%, поліпшенню стабільності до сировиділення та формуванню більш однорідної текстури у йогуртах і кефірах (рис. 1) [5].

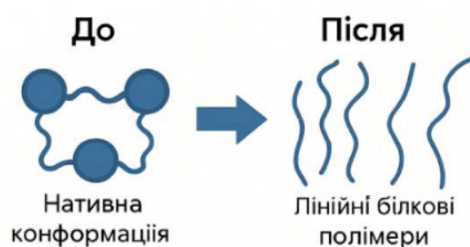


Рис. 1. Зміна білкових структур після обробки

Важливо відзначити, що технологія обробки білкових молекул дає змогу модифікувати властивості продукту без додавання стабілізаторів чи загусників, що відповідає сучасним вимогам до «чистої етикетки». Перспективи застосування цієї технології охоплюють також розроблення білкових основ для десертів, дієтичних продуктів та високобілкових напоїв.

Таким чином, обробка білків у роторно-пульсаційних апаратах є інноваційним і ефективним методом модифікації білкових структур, що відкриває нові можливості для підвищення якості кисломолочної продукції та розширення асортименту функціональних харчових виробів [6].

Найбільш розповсюдженим способом для операції перемішування після ферментації є безперервне перемішування ферментованої маси резервуарі під час операції передачі в охолоджувач [7]. Однак стандартне перемішування в ємності призводить до великої втрати в'язкості. Другий спосіб, а саме використання статичного фільтра, був найкращою альтернативою для підвищення гомогенності продукту, але розроблення нових інгредієнтів, деякі інновації у тектурі, складність існуючих ліній для більшого змішування різних продуктів та зміна цільової в'язкості вимагають нової, більш гнучкої системи для цієї операції [8]. З іншого боку, виробництво йогурту з перемішуванням із використанням статичного фільтра неможливе без заміни фільтра в процесі виробництва через утворення пробок [9].

Отже, найбільш ефективними пристроями для операцій впливу на білкові структури є роторні машини та апарати. Але широке розмаїття таких конструкцій ускладнює їх вибір для застосування у промисловому виробництві [10].

Формулювання мети дослідження. Основною метою статті є виконати аналіз існуючих конструкцій роторних машин і апаратів, які здатні найбільш ефективно виконувати операцію створення гомогенних білкових структур у технологічних лініях виробництва кисломолочних продуктів.

Основна частина. За останні 25–35 років запропоновано десятки патентних документів, спрямованих на вдосконалення конструкції роторних (роторно-пульсаційних) пристроїв (РП), причому не завжди наведені зміни призводять до підвищення ефективності процесу [11]. Проаналізуємо типові конструктивні рішення РП, які дають змогу підвищити ступінь диспергування та (або) зменшити питомі енерговитрати цього процесу [12].

Використовувати кінетичну енергію струменів, що вириваються з отворів 3 статори 2, на збудження вторинної (гідродинамічної) кавітації дає змогу розташування в робочій камері 1

роторного апарату [13] стрижнів 4 (рис. 2а). Вони турбулізують потік рідини, що разом із кавітацією інтенсифікує процеси диспергування.

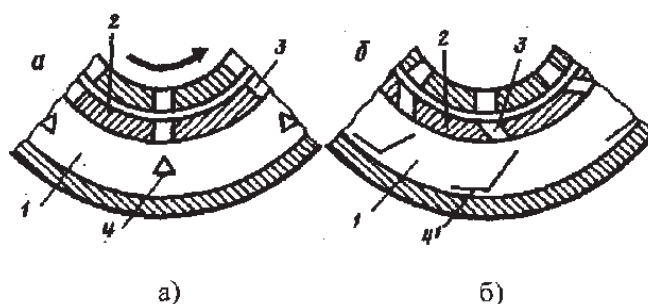


Рис. 2. Схеми розташування у робочій камері додаткових турбулізуючих елементів:
а) стрижнів; б) пружних елементів

Також у робочій камері 1 рекомендується розміщувати пружинні елементи 4, установлені навпроти вихідних отворів каналів 3 статора 2 під кутом, близьким до 90° по відношенню до витікаючого струменя (рис. 2б).

Функції пружинних елементів полягають у такому. Витікаючий струмінь ударяється у пружинний елемент. При цьому потік рідини, взаємодіючи з відбитим струменем, створює у робочій камері додаткові вихрі, сприяючи тим самим кращому перемішуванню і диспергуванню компонентів середовища. Пружинний елемент, прагнучи зайняти початкове положення, створює у рідині механічні коливання, що додатково дроблять краплі оброблюваного продукту. Із метою інтенсифікації процесів емульгування був розроблений роторний апарат, у якому як додаткове джерело коливань використовували пластину, розміщену в каналі статора [14] (рис. 3).

Переваги такого розташування пластини полягають у тому, що все оброблюване середовище проходить через канали статора і піддається дії коливань, генерованих пружною пластиною, у невеликому обсязі, що призводить до збільшення щільності акустичної енергії. Для роботи цієї конструкції у резонансному режимі необхідно варіювання геометричними і режимними параметрами.

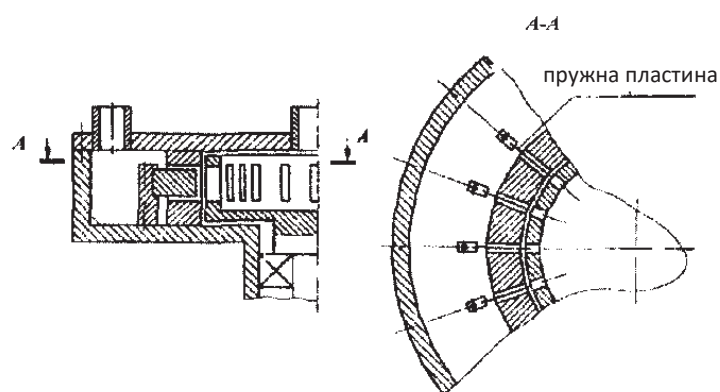


Рис. 3. Апарат із пружними пластинами

Одним зі способів підвищення диспергуючої здатності роторного апарату є модифікація порожнини ротора, наприклад виконання на внутрішній торцевій його поверхні голчастих елементів [14]. Оброблюване середовище, що подається за допомогою насоса

в порожнину 2 ротора, що обертається, 1, розбиваючись об вістря голок 3, піддається при цьому інтенсивнішому перемішуванню і диспергуванню (рис. 4). Іншою модифікацією порожнини ротора є виконання його внутрішньої поверхні зубчастої – у вигляді клиновидних лопаток [15].

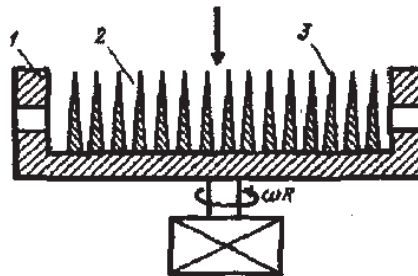


Рис. 4. Голчаті елементи на внутрішній торцевій поверхні ротора

Для зниження тривалості «холостого ходу» в РПА (за перекриття наскрізних каналів статора проміжками між отворами ротора) пропонується збільшити кількість рядів каналів ротора і статора [12]. Необхідно, щоб ряди каналів у роторі були зміщені один відносно одного. На думку авторів, це призводить до збільшення частоти генерованих пульсацій і до оптимального розподілу акустичного навантаження на оброблювану рідину в часі. На цьому припущенні розроблений високочастотний багаторядний апарат працює так (рис. 5). Рідка суміш подається під тиском у порожнину ротора, що обертається, 4, який знаходиться в корпусі 1. Далі по каналах 6 через проміжок 3 потік поступає в канал 7 статора 5 і спрямовується в робочу камеру 2. У результаті частота генерації імпульсів тиску в розглянутій конструкції значно вища, ніж у типовій.

Автори [15] пропонують у корпусі 1 розташовувати статор 5 усередині ротора 4 (рис. 6). Оброблювана рідина подається через вхідний патрубок 2 у робочу камеру і виводиться через вихідний патрубок 3 із внутрішньої порожнини статора. Принцип роботи апарату той самий – періодичний збіг каналів ротора 6 з каналами статора 7.

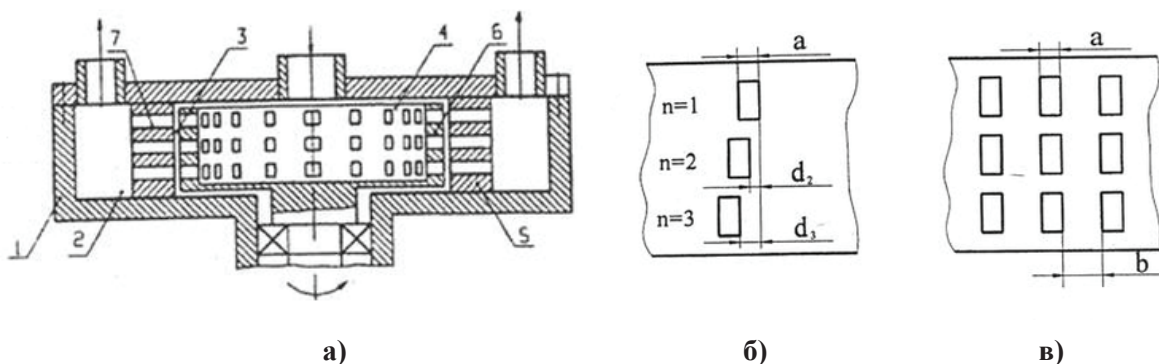
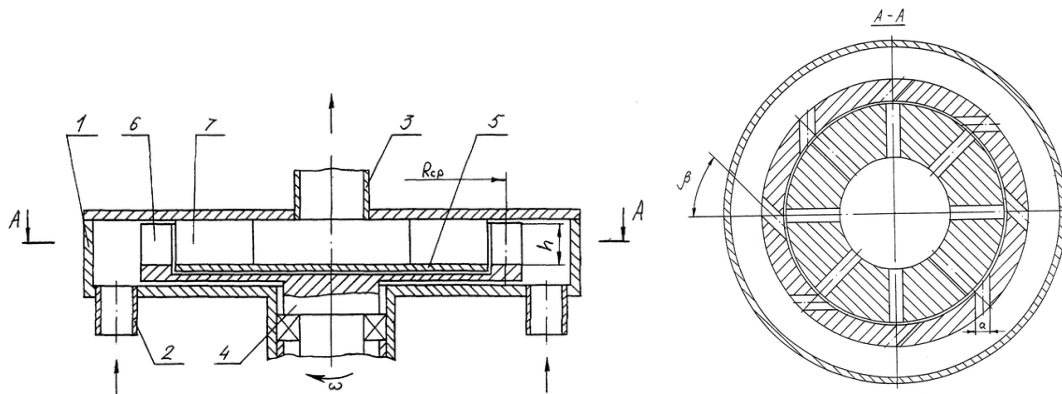


Рис. 5. Високочастотний багаторядний роторний імпульсний апарат кавітації: а) подовжній розріз; б) розгортка бічної поверхні ротора; в) розгортка бічної поверхні статора

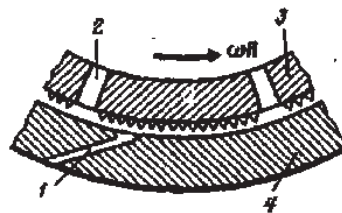
Оскільки канали статора спрямовані один назустріч одному (їх число має бути парним) і розташовані під кутом, у його порожнині в малому обсязі відбувається концентрація акустичних коливань, що сприяє інтенсифікації хіміко-технологічних процесів. Окрім того, в апараті можливе виникнення явища стоячої хвилі.

**Рис. 6. Апарат із внутрішнім статором**

Роторно-пульсаційний акустичний апарат для збільшення потужності акустичного випромінювання пропонують автори [16]. Він містить виконані на диску ротора пази, кількість яких рівна або кратна кількості пружних лопаток, що сполучають ротор із матчиною. Це призводить до того, що в місцях з'єднання ротора з матчиною жорсткість диска зменшиться, а амплітуда його коливань за дії пульсуючих тисків і швидкості потоку оброблюваної рідини збільшиться. Додаткові коливання, що виникають, інтенсифікують процеси диспергування емульсії.

Для збільшення ефективності технологічних процесів у РПА ротор і статор виконують з отворами або прорізами різних форм: прямокутні, квадратні, круглі, трикутні. Для збільшення міри турбулізації і пульсаційної швидкості потоку автори [16] пропонують таке:

1) Виконувати канали ротора 3 і статора 4 із поперечним перерізом Г-подібної форми і на зовнішню поверхню ротора нанести насічки (рис. 7). У процесі проходження оброблюваного середовища через канали статора 1 та ротора 2 такої форми за їх поєднання різко змінюється площа прохідного перерізу, швидкість течії рідини і амплітуда генерованих коливань і пульсацій, що, зрештою, сприяє розвитку турбулентного режиму роботи роторного апарату.

**Рис. 7. Г-подібні канали ротора з насічками**

2) Виконати нарізки на стінках каналів ротора і статора в протилежних напрямках [17]. Під час попадання в канал ротора оброблюване середовище закручується по спіралі, потім (за поєднання каналів) вона потрапляє у канал статора і закручується в протилежному напрямку. У результаті цього відбувається додаткова турбулентна обробка перемішуваних компонентів суміші, що диспергується.

3) Виконати кожний отвір статора у вигляді конфузора, а отвір ротора – у вигляді каналу, вісь якого паралельна одній зі сторін конфузора [17] (рис. 8).

Оскільки в процесі обертання ротора 3 його канал 4 паралельний до найближчої сторони каналу 2 статора 1, то середовище, що рухається в робочу камеру, відчуває відносно малий гідравлічний опір. Оскільки оброблювана рідина, що знаходиться в каналах ротора, бере

участь одночасно і в радіальному, і в окружному русі, то вектор її повної швидкості не перпендикулярний дотичній до циліндричної поверхні. Тому виконання каналу ротора, за якого його вісь співпадає з напрямком вектору повної швидкості середовища, є оптимальним. Таким чином, на початковій стадії проходження через канали рідина розганяється до значної швидкості. Потім потік натрапляє на не паралельний осі каналу ротора бік конфузторного каналу 2, у зв'язку з чим швидкість його течії падає і збільшується міра турбулізації.

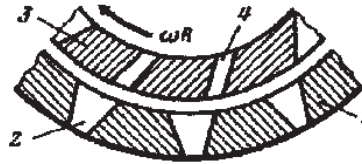


Рис. 8. Канали статора у вигляді конфузора

4) В апараті з конфузтор-дифузторними каналами ротора 3 і статора 4 рекомендують з'єднати вхід і вихід кожного з них пружними мембранами 5 (рис. 9).

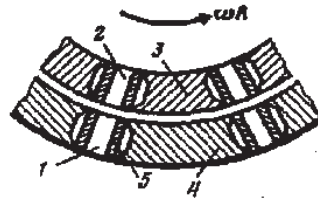


Рис. 9. Канали ротора та статора з пружними мембранами

На основі вище розглянутих конструктивних і технологічних особливостей апаратів можна зробити такі висновки:

- практично всі конструктивні елементи проєктуються для підвищення амплітуди пульсацій тиску, зсувних напруг, розвитку турбулентності і кавітації;
- в існуючих конструкціях резонаторів у вигляді голок, мембран та інших пружних елементів неможливо створювати режими, де б частота вібрацій і пульсацій регулювалася незалежно від частоти обертання ротора; такі можливості присутні тільки у останніх двох конструкціях; відзначено, що частота вібрації ротора повинна бути кратна частоті перекриття отворів;
- не проведені дослідження якості диспергування та ґрунтовні теоретичні дослідження пристроїв зі збудниками механічних коливань.

Ефективним методом підвищення ефективності роторний-пульсаційних апаратів є накладення механічних коливань на оброблюване середовище для виникнення резонансних явищ. Співставлення двох способів введення енергії в рідину: у роторному-пульсаційному апараті і за накладання механічних коливань показує, що дисипація буде відбуватися в усьому обсязі з однаковою інтенсивністю. При цьому вдасться усунути застійні зони з низьким градієнтом швидкості, значно підвищити швидкість ковзання жирової кульки та позбавитися недоліків у дисперсному складі оброблюваного продукту.

Таким чином, найбільший потенціал для використання в технологічних схемах виробництва кисломолочної продукції конструкції роторних апаратів мають роторні апарати з вібруючим ротором. Вони мають широкий діапазон регулювань та впливу на білкові структури, низькі енерговитрати завдяки рівномірній дисипації енергії по обсягу середовища, що обробляється, та високу продуктивність.

Висновки. Проведено аналіз застосування потенційно найбільш ефективних конструкцій роторних машин і апаратів, придатних для обробки білкових структур кисломолочних продуктів. З'ясовано, що переважна більшість конструкцій має суттєві недоліки, зокрема неможливість окремого регулювання частоти вторинних (накладених) пульсацій та вібрацій, завдяки чому суттєво знижуються інтенсивність резонансних явищ та інтенсивність обробки.

Найбільший потенціал для використання в технологічних схемах виробництва кисломолочної продукції конструкції роторних апаратів мають роторні апарати з вібруючим ротором. Вони мають широкий діапазон регулювань та впливу на білкові структури, низькі енерговитрати завдяки рівномірній дисипації енергії по обсягу середовища, що обробляється, та високу продуктивність.

Список використаних джерел

1. M. Rayner P. Dejmek Engineering Aspects of Emulsification and Homogenization in the Food Industry; CRC Press, Taylor & Francis Group 322. 2015. ISBN 9781466580435 doi: 10.1201/b18436.
2. Håkansson, A., Fuchs, L., Innings, F., Revstedt, J., Trägårdh, C., Bergenståhl, B. Velocity measurements of turbulent two-phase flow in a high-pressure homogenizer model. *Chem. Eng. Commun.* 2013, 200, 93–114. <https://doi.org/10.1080/00986445.2012.691921>
3. Dhankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR J. Eng.* 2014, 4, 1–8. <https://doi.org/10.9790/3021-04540108>
4. Huppertz T. Homogenization of Milk Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification). In *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 2nd ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2011, 761–764. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00226-0>
5. Samoichuk K., Yalpachyk V., Kholobtseva I., Dmytrevskyi D., Chervonyi V. Design Improvement of the Rotary-Pulsation Device by Resonance Phenomena. In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Edl, M., Machado, J., Xu, J. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. DSMIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2024. pp 74–83.
6. Yong, A., Islam, M., Hasan, N. The Effect of pH and High-Pressure Homogenization on Droplet Size. *Sigma J. Eng. Nat. Sci.* 2017, 35, 1–22. <https://doi.org/10.26776/IJEMM.02.04.2017.05>
7. Valencia-Flores D., Hernández-Herrero M., Guamis B., Ferragut V. Comparing the Effects of Ultra-High-Pressure Homogenization and Conventional Thermal Treatments on the Microbiological, Phys, and Chem Quality of Almond Beverages. *J. Food Sci.* 2013, 78, 199–205. <https://doi.org/10.1111/1750.3841.12029>
8. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Івженко А.О., Левченко Л.В. Аналіз конструкцій гомогенізаторів молочної промисловості. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2016. Вип. 16. Т. 1. С. 9–15.
9. Основи розрахунку та конструювання обладнання переробних і харчових виробництв : підручник / К.О. Самойчук та ін. Київ : Проф. книга, 2020. 428 с.
10. Wang X. Wang Y., Li F., Li L., Ge X., Zhang S., Qiu T. Scale-up of microreactor: Effects of hydrodynamic diameter on liquid–liquid flow and mass transfer. *Chem. Eng. Sci.* 226, 115838 (2020) doi: 10.1016/j.ces.2020.115838
11. J. Morales A. Watts J. McConville, Mechanical particle-size reduction techniques. *AAPS Adv. Pharm. Sci.* 22, 2016. 165–213. doi: 10.1007/978-3-319-42609-9_4
12. Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва: лабораторний практикум / В.Ф. Ялпачик та ін. Мелітополь : Видавничий будинок Мелітопольської міської друкарні, 2017. 274.
13. Acharyaa S., Mishrab V.; Patelc J. Enhancing the mixing process of two miscible fluids: A review. *AIP Conference Proceedings* 2021, 2341, 030025 <https://doi.org/10.1063/5.0051818>
14. Ciron C. Gee V. Kelly A. Auty M.. Comparison of the effects of high-pressure microfluidization and conventional homogenization of milk on particle size, water retention and texture of non-fat and low-fat yoghurts. *Int. Dairy J.* 2010, 20, 314–320. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.11.018>
15. Wang X., Wang Y., Li F., Li, L., Ge X., Zhang S., Qiu, T. Scale-up of microreactor: Effects of hydrodynamic diameter on liquid–liquid flow and mass transfer. *Chem. Eng. Sci.* 2020, 226, 115838. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115838>



16. Liao Y., Lucas D.A. Literature review of theoretical models for drop and bubble breakup in turbulent dispersions. *Chem. Eng. Sci.* 64. 2009. 3389–3406 doi: 10.1016/J.CES.2009.04.026

17. Postelmans A., Aernouts B., Jordens J., Van Gerven T., Saeys W. Milk homogenization monitoring: Fat globule size estimation from scattering spectra of milk. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 60, 102311, 2020. doi: 10.1016/j.ifset.2020.102311

Стаття надійшла до редакції 08.05.2025

K. Samoichuk¹, Y. Priss¹

¹ *Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

ANALYSIS OF ROTARY DISPERSOR DESIGNS FOR CREATING HOMOGENEOUS PROTEIN STRUCTURES

Summary

In the industrial engineering industry, one of the important directions is the development and implementation of equipment for technological lines for the production of fermented milk products. After all, this branch of milk processing and dairy production is strategic for ensuring the food security of Ukraine. The operation of providing a homogeneous structure after fermentation of fermented milk products is a key process in the production of a mixed or drinking fermented milk product, such as mixed or drinking yogurt. This operation is usually performed using filters or valve (slot) devices. However, such designs are inefficient: they have low productivity and high energy consumption. In order to increase the energy efficiency and quality of the processes for the production of fermented milk products, it is necessary to develop an effective design of a rotary disperser that will meet modern conditions of competitive production, that is, with small dimensions, weight, cost and ease of maintenance, they will have low energy consumption, high productivity, versatility (a wide range of adjustments for processing various fermented milk products) and high processing quality.

An effective method of increasing the efficiency of rotary-pulsation devices is the imposition of mechanical vibrations on the processed medium to cause resonance phenomena. A comparison of two methods of introducing energy into the liquid: in a rotary-pulsation device and when imposing mechanical vibrations shows that dissipation will occur throughout the volume with the same intensity. In this case, it will be possible to eliminate stagnant zones with a low velocity gradient, significantly increase the sliding speed of the fat globule and get rid of shortcomings in the dispersed composition of the processed product.

Thus, the greatest potential for use in technological schemes for the production of fermented milk products is the design of rotary devices with a vibrating rotor. They have a wide range of adjustments and influence on protein structures, low energy consumption due to uniform dissipation of energy over the volume of the processed medium and high productivity.

Keywords: protein structures, fermented milk products, protein denaturation, disperser, rotary-pulsation machine.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-26>

УДК 662.8.055:665.3

К. О. Самойчук¹, докт. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3423-3510

В. А. Самохвал¹, аспірант

ORCID: 0000-0001-5539-3647

¹ Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: kyrylo.samoichuk@tsatu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ ВІДХОДІВ ПРОВІЮВАННЯ СОНЯШНИКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗМІННИХ ШНЕКІВ

Анотація. Проведено дослідження процесу ущільнення рослинної біомаси шнековим механізмом із метою виготовлення паливних брикетів. Виявлені закономірності стали підґрунтям для визначення оптимальних параметрів роботи обладнання. У процесі проектування брикетувальних пресів необхідно врахувати особливості деформації біомаси, а також зміну її фізичних властивостей у момент контакту з робочими органами. Шнековий метод брикетування має перевагу завдяки поєднанню процесів транспортування й ущільнення, що забезпечує безперервність роботи за стабільної швидкості. Процес ущільнення біомаси шнековим механізмом відбувається у три стадії, та основним чинником, що впливає на продуктивність преса та якість брикету, є крок витків шнеків. Проведено експериментальні дослідження зі зміною кроків витків шнеків, що дали можливість визначити оптимальні показники пресового обладнання для отримання високої продуктивності та якісного щільного паливного брикету.

Ключові слова: олія, достискання, дослідження, біомаса, брикет, прес, формування.

Постановка проблеми. В Україні щороку формується значний економічно доцільний потенціал вторинної біомаси, який може бути використаний для виготовлення біопалива [1; 2]. Перспективи розвитку біоенергетики в аграрному секторі є стратегічно важливими для зміцнення енергетичної незалежності держави та значного зниження обсягів імпорту енергоносіїв, а також розширення шляхів використання відновлюваних джерел енергії шляхом залучення побічної аграрної продукції до енергетичного циклу [3; 4]. Брикети з оліємістких культур розглядаються як ефективна й екологічно безпечна альтернатива традиційним джерелам теплової енергії, таким як буре вугілля, природний газ або мазут [5]. Брикети, виготовлені з таких культур, як соняшник, соя, рапс, коріандр, мають високу теплотворну здатність, що забезпечує їм конкурентоспроможність на паливному ринку [6]. При цьому екологічні переваги біобрикетів, зокрема дуже низький рівень викидів шкідливих речовин під час згоряння, значно перевищують відповідні показники інших традиційних видів палива. Щільність сформованих брикетів становить 800–1250 кг/м³, що сприяє їх зручному транспортуванню та довготривалому зберіганню без втрати якості. Процес брикетування оліємісткої сировини характеризується відносно низькими енергетичними витратами [7]. Технологія формування паливних брикетів реалізується під дією високого тиску за допомогою машин, шнекових прес-екструдерів. Незважаючи на тривалий період експлуатації шнекових пресів у промислових умовах, сучасна науково-технічна база все ще не забезпечує наявності достатньо обґрунтованих методик для точного розрахунку оптимальних параметрів процесу ущільнення біомаси [8]. Відсутність адекватного фізичного опису процесів, що відбуваються в зоні пресування, призводить до того, що велика кількість брикетувальних машин на практиці працює у нерегламентованих режимах, що негативно позначається на їхній ефективності та ресурсі. Дуже часто завдяки експериментальним дослідженням підвищують продуктивності шнекових прес-екструдерів [9]. Саме тому дана тематика є надзвичайно актуальною й потребує більшого вивчення. Результати

досліджень та розробки у цій сфері мають сприяти суттєвому поліпшенню техніко-економічних показників роботи шнекових брикетувальних установок.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз останніх досліджень та технологічних підходів до виробництва біопалива з відходів соняшнику свідчить про нагальну потребу у проведенні подальших досліджень, спрямованих на зниження енерговитрат та поліпшення якості готового продукту. Серед пріоритетних завдань також виділяються модернізація машин для ущільнення з метою підвищення їхньої надійності, розширення технологічних можливостей щодо переробки різних видів аграрної сировини, а також оптимізація параметрів сировини для досягнення високої щільності готової продукції [10]. Будь-яка біомаса складається з твердої та газоподібної фаз. Основу дисперсного середовища формують тверді органічні частинки, тоді як дисперсною фазою є мікроскопічні пухирці повітря [11]. Особливості механічних властивостей такої дисперсної маси визначаються тим, що рослинні частинки розділені повітряними прошарками, через які діють сили молекулярного притягання. Саме ці сили забезпечують структурну міцність біомаси в процесі формування паливних брикетів. У процесі зміни дисперсного середовища, наприклад за зменшення об'єму повітряних проміжків між окремими частинками, посилюється їх молекулярне зчеплення між собою, що призводить до підвищення щільності структури та зменшення енергетичних витрат [12]. Щільність паливних брикетів істотно зростає зі збільшенням прикладеного тиску, а також зі зменшенням вологості відходів провіювання соняшнику. Під час пресування оліємісткої біомаси вологість її повинна бути 5–12,5%, за збільшення вологості отримані брикети матимуть низьку щільність, а за зниження виникатимуть надмірне тертя та перегрів обладнання, що теж сприятиме недостатній механічній міцності готового продукту [13]. Під час пресування оліємісткої сировини найкращі результати забезпечуються за температури 75–85°C, оскільки за нижчих та вищих температур механічна міцність паливних брикетів знижується [14].

Для отримання високої якості брикетів необхідно витримувати матеріал у пристрої остаточного формування під дією високого тиску протягом певного часу, що сприяє зменшенню пружних напружень у структурі. Контрольоване підвищення температури біомаси дає змогу знизити необхідний для ущільнення тиск без утрати якості готової продукції.

Вагомий внесок у розвиток теоретичних і практичних основ використання біомаси для виробництва газоподібного, рідкого та твердого палива зробили вітчизняні вчені Г.Г. Гелетука, В.А. Герасимович, В.О. Дубровін, Т.А. Железна та інші дослідники [15]. Їхні праці присвячені вивченню технологічних режимів переробки біосировини, особливостей роботи обладнання та оцінці енергоефективності обладнання. Із досліджень встановлено, що якість процесу пресування рослинної сировини та рівень енергетичних витрат на його реалізацію визначаються комплексом взаємопов'язаних конструктивних і технологічних чинників. До конструктивних чинників належать тип і схема обладнання, геометрія робочих органів та характер взаємодії останніх із масою сировини. Серед технологічних чинників ключовими є вологість і ступінь подрібнення матеріалу, величина прикладеного тиску, тривалість витримки в камері пресування, уміст олійної частки та температурні умови. Процес ущільнення біомаси умовно поділяється на три стадії. На першій стадії здійснюється первинне ущільнення: частинки сировини наближаються одна до одної, частково переміщуються, що сприяє заповненню порожнин. Друга стадія характеризується інтенсивним ущільненням під дією підвищеного тиску: завдяки пружним і пластичним властивостям частинки взаємо проникають і деформуються, наближаючись одна до одної. На третій стадії за умов максимального тиску відбувається остаточне об'ємне ущільнення брикету шляхом переходу пружних деформацій у пластичні. Будь-яке пресування супроводжується інтенсивним виділенням теплової енергії, яка відіграє важливу роль у зміні фізичних властивостей сировини. Контрольоване підвищення температури викликає

розм'якшення лігніну, що міститься у клітинних стінках рослин, сприяючи його переходу у пластичний стан та забезпечуючи склеювання частинок брикету між собою. Водночас процеси полімеризації лігніну призводять до формування суцільної однорідної та міцної структури, що значно підвищує механічну стійкість готових виробів.

Формулювання мети статті. Метою роботи є підвищення продуктивності процесу виготовлення паливних брикетів з оліємісткої сировини, уточнення технологічних закономірностей функціонування шнекових робочих органів, зокрема кроку шнеків, що дасть можливість прогнозувати поведінку сировини в процесі пресування.

Основна частина. Рух біомаси всередині шнекового механізму має складну просторову траєкторію, що зумовлюється особливостями геометрії гвинтової поверхні шнека та зеєрної камери. Частинки сировини не переміщуються лінійно вздовж осі обертання, а здійснюють гвинтоподібний рух зі змінними параметрами швидкості як в осьовому, так і в радіальному напрямках. Ці параметри залежать від кількох ключових чинників: відстані окремих частинок до центральної осі шнека, величини прикладеного зусилля до них, коефіцієнта тертя між сировиною та поверхнею робочих органів, а також від протитиску, що виникає у зоні підготовки та формування паливного брикету. Загалом процес брикетування у шнековій робочій камері умовно поділяється на два взаємопов'язані етапи, які водночас і взаємно перетікають один в інший. Перший етап охоплює транспортування біомаси до зони пресування, яке супроводжується поступовим ущільненням сировини, оскільки шнеки мають змінний крок – цей етап поєднує функції переміщення та попереднього ущільнення (транспортна фаза). Другий етап полягає у продавлюванні ущільненої маси через формуючий канал конічної матриці, що відповідає процесу так званої сухої екструзії, тобто формування брикетів без додавання додаткових сполучних рідин чи пари (технологічна фаза). Особливістю шнекового брикетування є тісна інтеграція транспортного та технологічного процесів. На відміну від багатьох інших пресових систем у шнековому механізмі ці процеси відбуваються одночасно й у безперервному режимі. Це забезпечує високу продуктивність системи за відносно компактною конструкцією та дає змогу досягати стабільних параметрів ущільнення і форми готового брикету без проміжних зупинок або зовнішнього регулювання подачі. Такий принцип дії особливо ефективний для великого серійного виробництва паливних брикетів із відходів провіювання таких культур, як соняшник, соя, рапс, коріандр.

Схему робочих органів обладнання зображено на рис. 1 [16].

Удосконалення конструкцій шнекових пресів базується на тривалому досвіді виробництва, який дав змогу накопичити значний емпіричний матеріал щодо особливостей функціонування обладнання в реальних виробничих умовах. Більшість наявних підходів до розрахунку параметрів цього процесу побудовано на теоретичних моделях взаємодії біомаси з робочими органами обладнання.

Проте попри значний обсяг дослідницької роботи сьогодні не існує уніфікованої, загальноприйнятої методики, яка б давала змогу точно визначати режими та параметри роботи шнекових пресів екструдерів під час роботи з оліємісткою сировиною. Це створює серйозні труднощі на виробництвах брикетів. Під час побудови математичної моделі процесу пресування рослинної біомаси шнековим механізмом часто використовується припущення про відсутність зворотних потоків матеріалу між витками шнеків. Це дає змогу спростити аналіз системи сил, що діють на масу під час її транспортування та ущільнення. Серед основних сил, які враховуються у розрахунках (рис. 2), можна виділити такі:

- нормальна сила тиску, що виникає у результаті контакту гвинтової поверхні шнека з біомасою;
- сила гідродинамічного опору, яка виникає через перепад тиску вздовж довжини каналу, що має конкретні геометричні параметри (ширину, глибину);

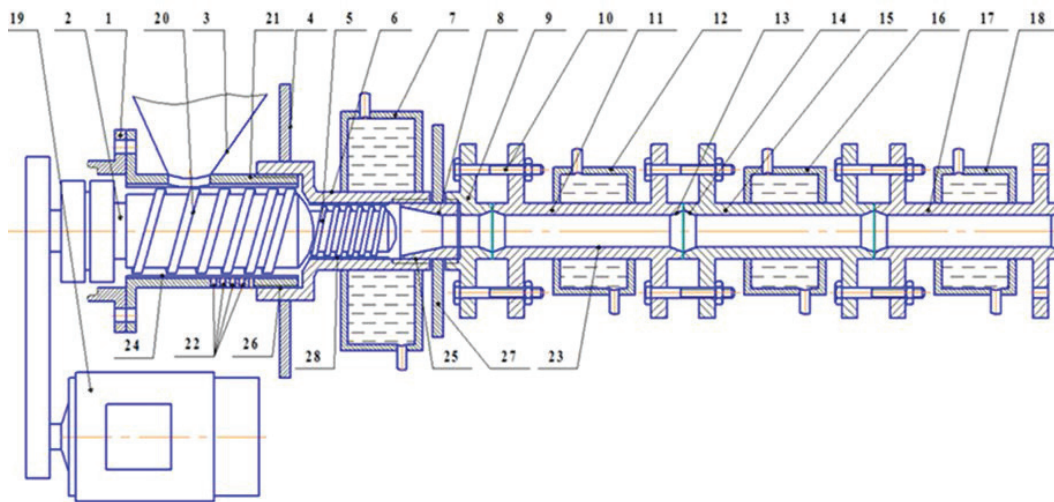


Рис. 1. Схема робочих органів розробленого прес-екструдера для виготовлення паливних брикетів:

1 – підшипниковий вузол; 2 – вал; 3 – бункер; 4 – фіксатор із рукояткою; 5, 20 – шнеки; 6 – камера дожиму; 7, 12, 16, 18 – система охолодження; 8 – конічна матриця; 9 – формуючий пристрій; 10 – болт; 11, 15, 17 – секції; 13, 14 – фаски для відбору олії; 19 – електродвигун; 21 – пресуюча камера; 22 – аварійні отвори; 23 – труба; 24, 28 зєєрні ребра; 25, 26 – різьбове з’єднання; 27 – рукоятка

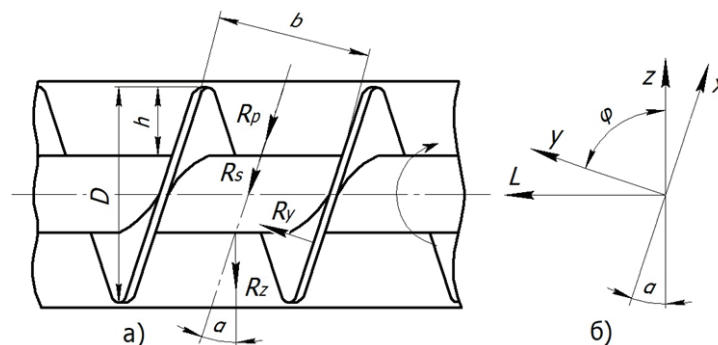


Рис. 2. Схема для розрахунку діючих сил що діють на шнеки: а) розподіл сил; б) векторний аналіз сил на осі x і y

– сила тертя, яка чинить опір просуванню сировини вздовж стінок шнека;
– тангенціальна сила тертя, спрямована уздовж циліндричної поверхні корпусу, яка виникає під час обертання матеріалу навколо осі шнека.

Загальна ефективність роботи преса безпосередньо залежить від збалансованості всіх цих сил, що зумовлює важливість точного інженерного розрахунку конструкційних параметрів і вибору потрібних режимів роботи шнекового прес екструдера. Тільки за комплексного підходу, що враховує як фізичні характеристики матеріалу, так і механіку взаємодії з обладнанням, можна забезпечити високу продуктивність, якість брикетів і довговічність машин.

Рівняння проєкцій сил на осі x і y мають такий вигляд:

$$dR_p + dR_s + (dR_z)_x = 0, \quad (1)$$

$$dR_y + (dR_z)_y = 0, \quad (2)$$

де $(dR_z)_x$, $(dR_z)_y$ – проєкції тангенціальної сили dR_z на осі x і y відповідно.

Після підстановки визначених параметрів у аналітичні вирази, що описують дію сил на елемент біомаси в каналі шнекового механізму, а також у результаті відповідних алгебраїчних і диференціальних перетворень, отримано узагальнене диференціальне рівняння, яке описує зміну тиску вздовж довжини робочого каналу шнека:

$$\frac{dp}{p} = \frac{f_s(2h + b + f_z b \sin \alpha) - f_z b \cos \alpha}{bh \sin \varphi} dL, \quad (3)$$

де p – тиск між витками шнека, Па; $b = \pi D \sin \varphi$ – ширина між витками шнеку, м;

L – довжина шнека, м;

D – діаметр витка, м;

φ – кут гвинтової лінії шнека, град.;

α – кут між площиною, яка перпендикулярна осі шнека, та між напрямком переміщення маси, град.;

f_s – коефіцієнт тертя біомаси об шнек;

f_z – коефіцієнт тертя біомаси об корпус.

Виконавши інтегрування обох частин отриманого диференціального рівняння за відповідними змінними, тобто інтегруючи ліву частину за координатою уздовж каналу шнека, а праву – за функцією тиску, з урахуванням заданих граничних умов можна отримати аналітичний вираз, що описує залежність тиску від довжини шнекового механізму.

$$p = p_0 \exp \left(\frac{f_s(2h + b + f_z b \sin \alpha) - f_z b \cos \alpha}{bh \sin \varphi} L \right), \quad (4)$$

Отримані рівняння встановлюють математичну залежність між тиском у робочому каналі шнекового механізму та його геометричною довжиною. Згідно з аналітичним розв'язанням, тиск у каналі має експоненційно зростаючий характер у напрямку від зони завантаження (бункера) до вихідного отвору (матриці), де формується брикет. Така залежність достовірна в рамках заданої моделі та прийнятих спрощень. При цьому продуктивність шнекових прес екструдерів прямо пропорційна низці конструктивно-технологічних параметрів, серед яких: лінійна швидкість транспортування біомаси витком шнеку, діаметр шнека, частота обертання валу, площі шагу витка, кут підйому спіралі, а також геометрична форма шнеку.

Було проведено серію дослідів із застосуванням змінних забірних шнеків із різним кроком витків, при цьому частота їх обертання становила 80 об/хв. Отримані результати занесли в табл. 1.

Таблиця 1

Результати досліджень показників якості брикетів

Маса брикету за 10 хв, кг.	29	24,3	17,1	12,5
Шаг шнеку, мм	90	70	50	40
Щільність брикету, т/м ³	0,9	1,2	1,23	1,28

Із досліджень бачимо, що спостерігається складна взаємозалежність між параметрами, що відповідають за якість і кількість продукції. Дослідно доказано, що за зміни геометричної параметрів каналу шнеку спостерігається зворотно-пропорційна тенденція: підвищення одного з параметрів сприяє збільшенню продуктивності, але водночас негативно впливає на якість брикету.

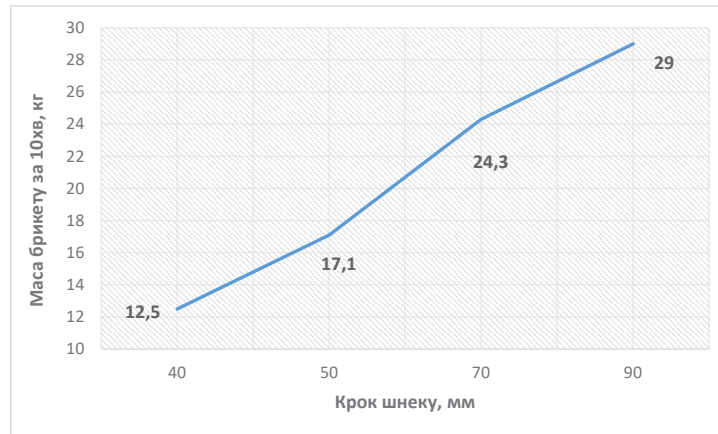


Рис. 3. Залежність продуктивності брикету від кроку завантажувального шнека

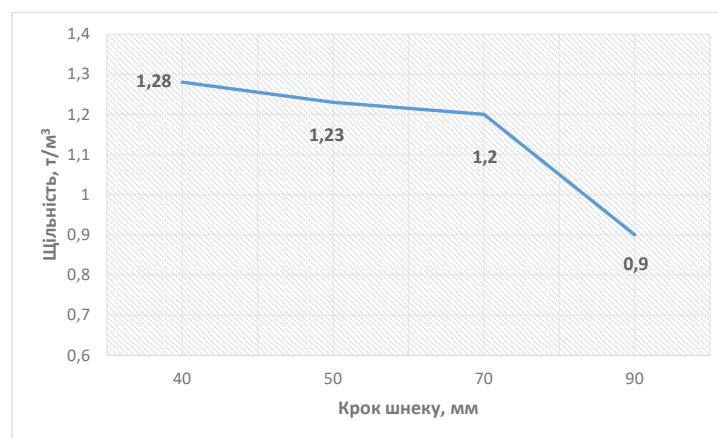


Рис. 4. Залежність щільності брикету від кроку завантажувального шнека

Таким чином, у конструктивній оптимізації важливо знайти баланс між часом, за який сировина проходить повний цикл, та якісними характеристиками кінцевого продукту. Із просуванням біомаси вздовж каналу шнека, що супроводжується поступовим зростанням контактної площі, відбувається нарощування загального стримуючого моменту. Такий ефект диференціації обертального руху спричиняє внутрішнє тертя між шарами біомаси та створює додатковий опір. Зокрема, у разі використання сировини з надмірним умістом олій можливе часткове ковзання маси по гвинтовій лінії шнека або навіть її реверсне зміщення. Це явище ускладнює стабільне ущільнення матеріалу та потребує оптимізації кроку витка шнеку. Із досліджень бачимо, що під час роботи з оліємісткою сировиною на розробленому нами пресовому обладнанні найкращий результат за співвідношенням якості та продуктивності був досягнутий за використання шнеку з кроком 70 мм.

Висновки. Із проведених досліджень можна зробити висновок, що в процесі шнекового брикетування оліємістка сировина захоплюється витком шнека і переміщується вздовж осі вала. Унаслідок цього виникає тертя між частинками біомаси та поверхнею зерної камери, а також обертовою поверхнею вала шнека. Однак продовження обертового руху обмежується силами тертя, які діють між біомасою та стінками корпусу. Це призводить до формування утримуючого моменту, що протидіє моменту, переданому від витка шнека, і забезпечує поступове ущільнення сировини. Таким чином, одним із головних чинників, що впливає на продуктивність та якість брикетів, є крок витків шнека преса.

Результати експериментальних досліджень доводять, що продуктивність та якість готового продукту напряму залежать від кроку шнека. Як показали дослідження для розробленого пресового обладнання, за використання як сировини відходів провіювання соняшнику найкращий результат за співвідношення якості та продуктивності отримано під час використання завантажувального шнеку з кроком 70 мм. Під час використання шнеків із більшим кроком відбувалося різке падіння щільності брикету до показника 0,9 т/м³, а за зменшення кроку – різке зниження продуктивності.

Список використаних джерел

1. Руденко Д.Т., Єременко О.І., Василенков В.Є. Дослідження в процесі брикетування рослинної біомаси шнековим механізмом. *Інженерія природокористування*. 2020. № 3(17). С. 15–22.
2. Самохвал В.А., Самойчук К.О. Виготовлення паливних брикетів на пресі екструдерного типу. *Науково-практична конференція молодих учених «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі»*, 24 лютого 2023 р. ТДАТУ, 2023. С. 11.
3. Полянський О.С., Д'яконов В.І., Д'яконов О.В. Комплексна оцінка енергетичних показників існуючих технологій переробки рослинних відходів у паливні брикети. *Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2018. Вип. 190. С. 192–202.
4. Гелетука Г.Г., Железна Т.А. Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. Ч. 1. *Промислова теплотехніка*. 2010. Т. 3. № 3. С. 73–79.
5. Самойчук К.О., Самохвал В.А. Перспективи використання біопалива з рослинної сировини. *Матеріали шостої міжнародної науково-практичної конференції «Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової 34 індустрії»*, 3–4 листопада 2022 р. Черкаси, 2022. С. 158–161.
6. Alonge A.F. Extraction of vegetable oils from agricultural materials: A review. In *Proceedings of the 12th CIGR Section VI International Symposium. CIGR – International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering*, 2019. 1184–1206.
7. Palamarchuk I., Mushtruk M., Gudzenko M., Vasylyv V., Slobodyanyuk N., Kuts A., Nychyk O., Bober A., Salavor O. Mathematical modeling, of the oil extrusion process with pre-grinding of raw materials in a twin-screw extruder. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. 14. 937–944. <https://doi.org/10.5219/1436>
8. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси / В.С. Бойко та ін. Київ : Проф. книга, 2021. С. 468.
9. Indartono Y.S., Heriawan H., Kartika I.A. Innovative and flexible single screw press for the oil extraction of Calophyllum seeds. *Research in Agricultural Engineering*. 2019. 65. 91–97.
10. Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М., Мотіль І.М., Госовський Р.Р. Дослідження процесу формування паливних брикетів із рослинної сировини та визначення їх характеристик. *Науковий вісник НЛТУ України*. С. 138–146.
11. Єременко О.І., Лук'янець В.О. Дослідження та вдосконалення живильного пристрою перспективного брикетного преса. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Вип. 4. Т. 2. С. 146–156.
12. Лук'янець В.О., Субота С.В. Вплив параметрів ущільнення рослинної біомаси на показники якості біопаливних брикетів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2014. Вип. 99. Т. 2. С. 103–113.
13. Bălăţatu C., Mateescu M., Anghelache D., Tăbăraşu A. The importance of moisture in extracting oils from oilseeds. A review. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering*. 2022. 2. 167–170.
14. Самохвал В.А., Самойчук К.О. Підвищення ефективності виробництва паливних брикетів з оліємістких сировин у шнекових прес-екструдерах. *Збірник тез доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2023»*, 18–19 травня 2023 р. Київ : Національний університет біоресурсів та природокористування України, 2023. С. 56–59.
15. Гелетука Г.Г., Железна Т.А., Драгнев С.В. Аналіз можливостей виробництва та використання брикетів з агробіомаси в Україні. *Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України*. 2018. № 20. С. 48.



16. Патент а202007249. Україна, МПК(2006): В30В.11/00, В30В 9/00, В27N 5/00 Шнековий прес-екструдер для виготовлення брикетів / патентовласник Самохвал Віталій Анатолійович – u202007249: заявлено. 13.11.2020: опубліковано. 18.05.2022. Бюл. № 20.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2025

K. Samoichuk¹, V. Samokhval¹

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

STUDY OF THE PROCESS OF COMPACTION OF SUNFLOWER HULLING WASTE USING A SCREW PRESS EXTRUDER

Summary

A study of the process of compaction of plant biomass with a screw mechanism for the production of fuel briquettes was conducted. The identified patterns became the basis for determining the optimal parameters of the equipment. In the process of designing briquetting presses, it is necessary to take into account the peculiarities of biomass deformation, as well as changes in its physical properties at the moment of contact with the working bodies. The screw briquetting method has the advantage of combining the processes of transportation and compaction, which ensures continuous operation at a stable speed. An important factor is the time spent by the briquetted material in the molding chamber at a constant temperature. At the initial stage of the compaction process, stresses are formed in the raw material, which cause complex, nonlinear deformations. These deformations are accompanied by displacement and reorientation of biomass particles without significant changes in their internal structure. At the second stage, as the load increases, a critical combination of stresses is reached, at which an equilibrium is established between the internal resistance forces of the material and the external forces applied by the working bodies of the equipment. This equilibrium is unstable and precedes a phase transition in the briquette structure. At the final third stage, a further increase in load causes the development of plastic deformations, as a result of which biomass particles change their shape and fit tightly together, which ensures final compaction and the formation of a strong briquette structure. The theoretical analysis of the process made it possible to establish the dependence of pressure on the length of the working body. It was found that the pressure increases in the direction from the feed hopper to the forming section. The disadvantage of most screw equipment is that its throughput capacity decreases with increasing briquette density.

Keywords: oil, ripening, research, biomass, briquette, press, molding.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-27>

УДК 669.01:621.9

О. О. Червоткіна, асистент

ORCID: 0009-0002-6814-0566

О. П. Прокопенко, асистент

ORCID: 0009-0005-7304-923X

Н. О. Паляничка, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-8510-7146

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: olena.prokopenko@tsatu.edu.ua

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ПАЛИВНИХ ПЕЛЛЕТ ІЗ ДЕРЕВИНИ ЛИСТЯНИХ ПОРІД

Анотація. Дані дослідження спрямовані на вивчення фізико-механічних властивостей паливних пелет, які отримуються з деревини листяних порід. У результаті дослідження встановлено, що використовувати листяні породи деревини у їх незмінному вигляді є недоцільним, оскільки отримані пелети з такої сировини мають знижену механічну міцність. Технологічним розв'язанням цієї проблеми стала обробка подрібненої деревної маси насиченою парою. Результати виробничих випробувань засвідчили, що таке активування деревних часток листяних порід дає можливість виробляти паливні пелети необхідного стандарту якості. Технічною рисою технології є застосування матриці з довжиною пресуючого каналу 33 мм.

Ключові слова: пелети, гранулювання, матриця, деревина, паливні гранули, пресуючий канал.

Постановка проблеми. Сучасна тенденція у розвитку паливно-енергетичного комплексу України пов'язується з якнайширшим застосуванням відновлюваних та екологічно безпечних джерел сировини. До таких найбільш доступних джерел належать відходи лісозаготівлі та переробки дерева. Ця сировина є висококалорійним паливом. Перспективним напрямом використання відходів деревообробних підприємств вважається виробництво пресованих матеріалів (біопалива) як паливних гранул. Сьогодні на ринку паливних пелет швидко зростає не тільки попит, а й сам ринок розширюється колосальними темпами [1].

У традиційній технології виробництва паливних пелет застосовуються хвойні породи дерев, а також відходи після обробки лісу. Слід зазначити, що деревина хвойних порід є дороговартісною та дефіцитною сировиною, а також вона широко використовується в деревообробній промисловості [2]. Попит на такі види сировини підвищений, тому ресурси цієї деревини неухильно скорочуються. Це зумовлює потребу здійснення робіт у напрямі залучення в технологію паливних пелет дешевшої та малоцінної деревини м'яколистяних порід, яка значною мірою все ще не має задовільного практичного використання в різних галузях промислового виробництва.

Аналіз останніх досліджень. Нині у багатьох країнах світу проводяться дослідження щодо отримання високоякісного палива, яке буде відновлюваним і матиме низьку собівартість [3]. Розроблення технологій переробки відходів потрібно виконувати з урахуванням комплексного застосування сировини та її екологічної безпечності. Сьогодні таким вимогам задовольняє біопаливо, яке можна отримувати за рахунок переробки відходів. Для того щоб отримати біопаливо, необхідно застосовувати технологію брикетування, але має бути попереднє сортування та подрібнення відходів, які надходять на комплекси сортування сміття [4].

Формування мети статті. Відомо, що технологія та якості застосованої деревної сировини значно впливають на якість здобутого біопалива. Тож інтерес становить дослідження фізико-механічних показників якості паливних пелет, вироблених із деревини листяних порід, та зіставлення їх із пелетами із хвойної деревини – сосни. Згідно з літературними даними, струк-

тура, морфологія та габарити анатомічних елементів істотно відрізняються не лише у хвойної та листяної деревини, а й у межах окремих порід [3].

Основна частина. Отримано паливні пелети з таких лісоутворювальних порід України: берези [*Betula verrucosa* Ehrh], вільхи [*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn] та сосни [*Pinus silvestris* L.]. Зразки було виготовлено за температури гранулювання 110°C, час пресування – 15 хв. Вологість вихідної сировини становила від 8% до 11%, використовувалася фракція розміром 1,0/3,0, охолодження пелет робили до температури 20°C. Для дослідження фізико-механічних характеристик одержаних зразків паливних пелет визначали такі показники: вологість, зольність, щільність, нижча теплота згоряння та механічна міцність. Результати випробувань отриманих паливних пелет подано в табл. 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики паливних пелет

Найменування показника	Порода деревини		
	Береза	Вільха	Сосна
Вологість, %	7,96	8,95	8,36
Зольність, %	0,77	0,71	0,27
Щільність, кг/м ³	1110	1200	1150
Механічна щільність, МПа	8,06	8,74	9,83
Нижча теплота горіння, МДж/кг	18,43	17,49	18,39

Із табл. 1 видно, що показники нижчої теплоти згоряння пелет із деревини листяних і хвойних порід можна порівняти, вони варіюються в інтервалі від 17,49 до 18,43 МДж/кг. Щодо зольності, то пелети з листяної деревини мають приблизно в 3,5 рази більшу зольність порівняно з хвойними породами. Однак утворюваний у процесі згоряння попіл може застосовуватися як добриво. Отримані з деревини вільхи та берези пелети мали знижену механічну міцність (відповідно на 11% і 18%) порівняно з тією, що досягається під час використання деревини сосни.

Це не дає змоги повною мірою використовувати її у складі паливних пелет. Наведені нижче результати промислових випробувань продемонстрували, що, застосовуючи додаткову обробку насиченою паром деревних часток із листяних порід, можна досягти показника механічної міцності паливних пелет (гранул), порівняного з показником використання деревини хвойних порід. Процес пропарювання деревних часток є досить дієвим способом підвищення механічної міцності паливних гранул.

Дія насиченої пари спричинила активізацію складників деревини, виникнення нових функціональних груп, які підсилюють адгезійні взаємодії у процесі формування пелет (гранул). Відбувалося додаткове зволоження деревних частинок, через що температура у прес-грануляторі зростала зі 110 до 120°C. Висока температура пресування сприяла швидкому плину реакцій та накопиченню все більшої кількості високомолекулярних сполук переважно за рахунок високореакційних геміцелюлоз. Розплавлені та розм'якшені складники заповнювали порожнечі між волокнами та капілярною і субмікрокапілярною системами клітинних стінок [4; 5]. Дедалі більше зростала кількість зшивок між молекулами компонентів деревини, зокрема і просторових, котрі й забезпечили формування міцні вироби. Отримували пелети у вигляді гранул таких геометричних розмірів: довжиною 10–30 мм та діаметром 6 мм. Уміст берези в композиції гранул становив 35%, вільхи – 20%, осики – 40%, сосни – 5%.

Промислова лінія повного циклу для виготовлення паливних гранул із пропарених деревних часточок охоплює таке основне обладнання: машина для рубання, подрібнювач, млин,

сушарка, прес-гранулятор, обладнаний пристроєм для подачі насиченої пари, охолоджувальною колоною та лінією для пакування. На рис. 1 представлено послідовність виконання операцій із застосуванням переліченого обладнання [6].

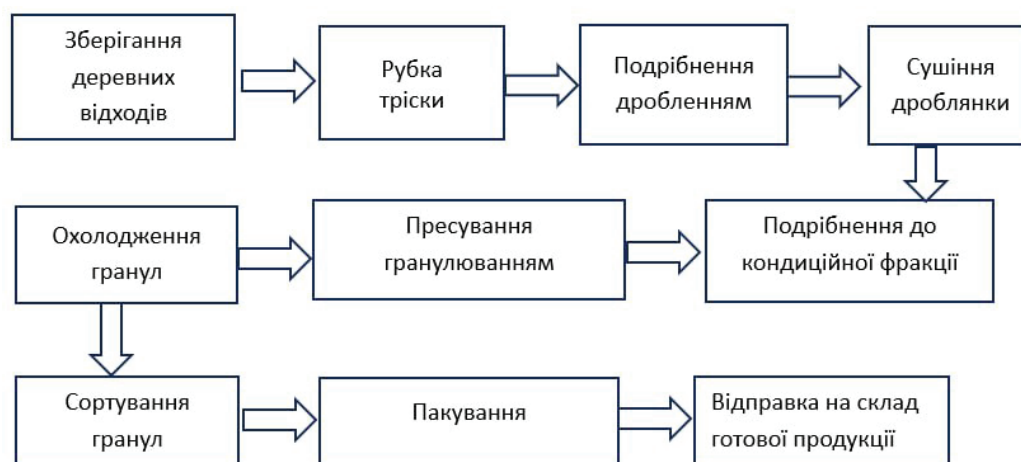


Рис. 1. Послідовність виконання операцій під час виготовлення паливних гранул із застосуванням деревини листяних порід

Загалом тепер технологічний процес одержання паливних гранул із застосуванням додатково до листяних порід деревини сосни є доволі простим, не трудомістким та найголовніше – автоматизованим.

Технічною рисою виробничого процесу стало використання матриці з довжиною ефективного пресувального каналу 33 мм (замість 45 мм), оскільки деревина листяних порід потребувала більш короткочасної термічної обробки порівняно з деревиною хвойних порід. У результаті відбулося зниження споживання електроенергії, що привертає особливий інтерес до використання деревини різних листяних порід технології паливних гранул.

Фізико-механічні властивості здобутих паливних гранул наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Фізико-механічні характеристики паливних гранул, виготовлених з обробленої насиченою парою деревини

Найменування показника	Вимоги	Порода деревини	
		Сосна	Суміш листяних порід
Вологість, %	9–10	7,9	6,3
Зольність, %	0,4–1,2	0,22	0,78
Щільність, кг/м ³	1200–1400	1170	1220
Частка, %	7,0–8,5	1,4	2,0
Нижча теплота згоряння	більше 16 900	17 520	17 810

Із табл. 2 видно, що у паливних гранул, вироблених з оброблених насиченою парою деревинних часточок, показник частки дріб'язку має низьке значення, яке перевищує його у 3,5 рази, що вказує на високу механічну міцність, яка зіставна з міцністю пелет, здобутих із деревини сосни. Листяні породи деревини виділяють достатню кількість тепла під час згоряння, що дає змогу робити висновок про їхню високу теплотворну здатність. Деяке збільшення показника зольності гранул, здобутих із композиції, що містить листяні породи деревини, знаходиться в межах припустимих значень.



Висновки. Проведені дослідження показали ймовірність майже повної заміни у виробництві паливних пелет у формі гранул цінної та дефіцитної деревини хвойних порід на недорогі та малоцінні м'яколистяні породи. Це досягається завдяки обробці деревних часток насиченою парою безпосередньо перед їх пресуванням (гранулюванням). Активування парою деревних часток листяних порід дає змогу отримувати паливні гранули з показниками.

Список використаних джерел

1. Червоткіна О.О., Олексієнко В.О., Фучаджи Н.О. Рациональное використання відходів виробництва морквяного соку *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2012. Вип. 12. Т. 4. С. 216–221.
2. Олексієнко В.О., Червоткіна О.О., Циб В.Г. Дослідження механізмів гранулювання. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2016. Вип. 16. Т. 1. С. 269–273.
3. Назаров В.І., Макаренков Д.А., Булатов І.А. Дослідження процесу гранулювання дисперсних відходів на роторних пресах із плоскою матрицею. *Вісник КПІ*. 2010. Т. 5. № 6. С. 13–16.
4. Модін Н.А., Єрошкін О.М. Брикетування подрібненої деревини та деревної кори. Київ : Ліра, 2020. 112 с.
5. Модін Н.А., Єрошкін О.М., Мурзіч Р.М., Гудців Р.І. Зусилля, що розпирають та коефіцієнти тертя при пресуванні подрібненої деревини в матрицях. Технічна інформація. Харків : ХНТУСГ, 2018. С. 23–26.
6. Івн С.Л., Глухівський В.М. Гранулювання деревини. Практичні та теоретичні основи, або Що відбувається всередині гранулятора. *Біоенергетика*. 2007. № 3. С. 15–19.
7. Завражнов А.А. Пресування деревних композиційних матеріалів із продукуючою парою і вакуумуванням : автореф. дис. ... канд.техн. наук. 2020. 19 с.
8. Юдіна Р.В. Розробка режимів гідравлічного вібратора преса підвищення фізико-механічних властивостей ущільненої деревини : автореф. дис. ... канд. техн. наук. 2017. 16 с.
9. Ялпачик В.Ф., Буденко С.Ф., Олексієнко В.О., Червоткіна О.О. Дослідження коефіцієнта тертя гранульованого жому моркви *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2018. Вип. 18. Т. 1. С. 112–118.
10. Червоткіна О.О., Стручаєв М.І., Тарасенко В.Г. Дослідження процесу гранулювання овочевих відходів за допомогою пресгранулятора з плоскою матрицею. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету* 2021. Вип. 21. Т. 1. С. 160–168.

Стаття надійшла до редакції 17.04.2025

O. Chervotkina, O. Prokopenko, O. Palyanychka

Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

FEATURES OF TECHNOLOGY OF FUEL PELLETS MADE FROM HARDWOOD

Summary

These studies are aimed at studying the physical and mechanical properties of fuel pellets obtained from hardwood. It was established that the use of these wood species in their unchanged form is impractical, since the pellets obtained from them have reduced mechanical strength. The technological solution to this problem was the treatment of crushed wood raw materials with saturated steam. The results of industrial tests confirmed that such activation of hardwood wood particles allows obtaining fuel pellets of the required quality standard. The technical feature of the technology is the use of a matrix with a pressing channel length of 33 mm.

Keywords: pellets, granulation, matrix, wood, fuel pellets, pressing channel.



ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-28>

УДК 637.143:613.22:614.3

Н. В. Будник, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2176-0650

О. В. Калашник, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-9281-2564

А. П. Кайнаш, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2830-2580

В. О. Назаренко, канд. техн. наук

ORCID: 0009-0004-7665-2504

В. М. Юхно, канд. с.-г. наук

ORCID: 0000-0002-3628-1305

Полтавський державний аграрний університет

e-mail: alla.kainash@pdau.edu.ua

БЕЗПЕЧНІСТЬ СУМІШЕЙ МОЛОЧНИХ СУХИХ ДЛЯ ДИТЯЧОГО ХАРЧУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Анотація. Метою статті є дослідження показників безпечності сумішей молочних сухих (СМС) для дитячого харчування, збагачених есенціальними жирними кислотами. Наукову новизну підтверджено дослідженнями показників безпечності розроблених СМС для дитячого харчування. Практичну цінність підтверджено виробництвом на ТОВ «Хорольський завод продуктів дитячого харчування» СМС для дитячого харчування удосконаленої технології.

На основі результатів дослідження показників безпечності збагачених СМС для дитячого харчування встановлено їх повну відповідність мікробіологічній безпечності вимогам ТУ У 10.8-40573272-004:2023.

Результати визначення токсичних елементів, умісту мелаїну, афлатоксину М1, активності радіонуклідів цезію-¹³⁷ та стронцію-⁹⁰ у зразках СМС для дитячого харчування удосконаленої технології підтвердили їх безпечність для споживання.

Перспективою подальших досліджень є визначення показників безпечності СМС для дитячого харчування після певного терміну зберігання.

Ключові слова: стандартизація, якість, токсичні елементи, радіонукліди, мікробіологічні показники, НАССР.

Постановка проблеми. У вирішенні питання харчування немовлят на першому місці, безсумнівно, стоїть грудне вигодовування. Але використання із цією метою сумішей молочних сухих (СМС) зростає з року в рік. Це пояснюється тим, що спеціальні суміші необхідні для альтернативного вигодовування, прикорму та для немовлят, які мають певні захворювання. Пропозиції закордонних та українських виробників за цим видом продукції досить різноманітні. Окрім того, розробляються нові види, які відповідають сучасним уявленням щодо збалансованості дитячого харчування за основними поживними речовинами.

У зв'язку із цим актуальним є збагачення СМС біологічно активними речовинами, необхідними для забезпечення належного розвитку дітей. Серед таких речовин одне з перших місць належить омега-3 та омега-6 жирним кислотам, обов'язкова наявність яких регламентується Вимогами до безпечності та окремих показників якості дитячого харчування, затверджених Наказом МОЗ України № 1084 від 23.06.2022 [1].

З іншого боку, зростає занепокоєння батьків безпечністю дитячого харчування, особливо через те, що немовлята більш уразливі до забруднювачів харчових продуктів. Ураховуючи ска-

зане, перед розробниками та виробниками стоїть першочергове завдання – забезпечення відповідності якості СМС, а саме за показниками безпечності, зазначеним вище вимогам [1].

Аналіз останніх досліджень. Як відомо, у розвинених країнах встановлено жорсткі вимоги щодо якості та безпечності харчових продуктів, призначених для дітей. Це особливо актуально для європейських країн, де ще у 2006 р. був введений Регламент Комісії № 1881/2006 щодо оброблених продуктів харчування на основі зернових та дитячого харчування для немовлят і дітей раннього віку, який у 2023 р. був змінений [2].

Нещодавні дані проведених досліджень свідчать про високі рівні забруднюючих речовин у різних видах харчування для немовлят, що вимагає подальшого ретельного вивчення. Автори [3; 4] поділяють забруднювачі харчових продуктів на такі групи: пестициди та залишки добрив; важкі метали та забруднювачі навколишнього середовища; токсини; забруднювачі процесу; пакувальні речовини.

Дослідженнями [4; 5] встановлено короткостроковий та довгостроковий негативний вплив забруднюючих речовин у харчових продуктах на здоров'я немовлят, якій може змінюватися залежно від типу та кількості впливу забруднюючих речовин. Прикладами негативного впливу важких металів є:

миш'як – впливає на розвиток грубої моторики у маленьких дітей [6];

свинець – впливає на розвиток нервової системи [7]; токсичний для розвитку нервової системи та підвищує ризик синдрому дефіциту уваги з гіперактивністю у дітей [8];

кадмій – пов'язаний зі зниженням IQ дитини, впливає на розвиток нервової системи [9].

У іншому дослідженні [10] було оцінено забруднення токсичними металами (Cd, Pb та Al), а також рівні основних мікроелементів (Mn, Cr і Co) у дитячому харчуванні для немовлят. Окрім того, зазначено, що рівні цих металів у досліджуваних зразках порівнювалися з допустимими межами токсичних важких металів і рекомендованими добовими нормами незамінних мікроелементів.

Відомо, що афлатоксини – це канцерогенні та високотоксичні метаболіти, що виробляються грибами роду *Aspergillus flavus* та *Aspergillus parasiticus*. Автори [11] переконують, що наявність афлотоксину спричиняє високий ризик раку печінки.

Одним із забруднювачів сумішей для дитячого харчування, що заноситься з пакуванням, є меламін – органічна сполука та тример ціанаміду зі структурою 1,3,5-тріазину, яка на 66% складається з азоту. Дослідженнями науковців було встановлено, що його вміст у сумішах для дітей призводить до виникнення каменів у нирках і гострої ниркової недостатності [12] та може викликати пухлини сечовивідних шляхів [13].

Вище перераховані забруднювачі мають великий вплив на здоров'я немовлят, особливо у перші місяці життя. Проте як харчовий продукт суміші сухі молочні можуть містити й мікроорганізми, такі як *Salmonella* та *Enterobacter sakazakii* тощо. Відомо, що зараження суміші сухої для дітей *Salmonella* та *Enterobacter sakazakii* є причиною захворювань немовлят, іноді із серйозними наслідками. Також дані мікроорганізми не витримують процеси пастеризації, які використовуються під час виробництва, але повторне забруднення СМС для дітей може відбуватися під час процесів обробки та наповнення. Тому заходи контролю із запобігання забрудненню СМС для дітей включають мікробіологічну безпечність інгредієнтів, зниження рівня *Enterobacteriaceae* у виробничому середовищі. Тобто суворих гігієнічних заходів, включаючи контроль за рухом персоналу; поділ мокрого і сухого процесів; забезпечення запобігання потраплянню конденсату та води в сухі приміщення й уникнення повторного забруднення кінцевого продукту [14].

Окрім того, у роботі [15] наголошується, що немовлята є більш чутливими до забруднюючих елементів, отже, дитяче харчування слід регулярно контролювати та перевіряти на їх уміст.



Також науковцями [16] представлено стратегії зниження ризику забруднення зазначених сумішей для забезпечення найвищих стандартів їхньої якості. Увесь процес виробництва СМС для дітей слід контролювати для: забезпечення використання сировини з найнижчими допустимими рівнями шкідливих речовин для гарантії безпечності кінцевого продукту; мінімізації ризиків забруднення під час обробки, зберігання та розповсюдження,

Таким чином, дослідження показників безпечності сумішей сухих молочних є актуальним завданням.

Формулювання мети статті. Мета статті – дослідження показників безпечності сумішей молочних сухих для дитячого харчування, збагачених есенціальними жирними кислотами. Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

здійснити аналіз інформаційних джерел щодо впливу забруднюючих речовин на здоров'я немовлят;

провести дослідження показників безпечності розроблених сумішей сухих молочних та оцінити їх відповідність нормативним документам;

сформулювати висновки та окреслити напрями подальших досліджень.

Основна частина. Роботу виконано відповідно до плану науково-дослідної роботи кафедри харчових технологій Полтавського державного аграрного університету в рамках наукових тем 0115U006745 «Інноваційні та ресурсозберігаючі технології харчових виробництв» та 0121U110650 «Якість і безпечність продукції у внутрішній і зовнішній торгівлі та торговельне підприємництво: сучасні вектори розвитку і перспективи».

Випробування проводилися у Науково-дослідному центрі харчової продукції Державного підприємства «Полтавастандартметрологія».

Під час виконання досліджень були використані такі методи:

мікробіологічні показники – були досліджені в повному спектрі кількості основних можливих мікробіологічних забруднень:

кількість МАФАНМ, в 1 г суміші – за ДСТУ 8446:2015 [17];

Staphylococcus aureus, у грамах суміші – за ДСТУ IDF 138:2003 [18];

Bacillus cereus, в 1 г суміші – за ДСТУ 8040:2015 [19];

Listeria monocytogenes, у 100 г суміші – за ДСТУ EN ISO 11290–1:2022 [20];

мікроскопічні гриби (пліснява), КУО в 1 г суміші – за ДСТУ 8447:2015 [21];

дріжджі, КУО в 1 г суміші – за ДСТУ 8447:2015 [21];

показники безпечності:

концентрація токсичних елементів – за робочими інструкціями НДВЦХП РІВЦ 7.2-03-18-2022;

уміст меламіну – за методикою РІВЦ 7.2.03 – 9-3-2020;

афлатоксин М1 досліджували на ІФА;

активність радіонуклідів цезій⁻¹³⁷ та стронцій⁻⁹⁰ визначено на спектрометрі енергій Бета-випромінювань СЕБ-01.

На базі ТОВ «Хорольський завод продуктів дитячого харчування», який багато років поспіль випускає суміші для дитячого харчування, розроблено нові види СМС, збагачених есенціальними омега-3 (рецептура А) та омега-6 (рецептура В) жирними кислотами, склад, органолептичні та фізико-хімічні показники якості яких подано в роботі [22].

Мікробіологічний стан СМС являє собою важливий аспект їх безпечності. Відповідно до плану проведення досліджень показників безпечності СМС для дітей, збагачених есенціальними жирними кислотами, початковим етапом було визначення їхніх мікробіологічних показників (табл. 1).

Таблиця 1

Результати досліджень мікробіологічних показників СМС для дитячого харчування удосконаленої технології

Назва показника	Суміш суха молочна для харчування дітей класична	Рецептури	
		А	В
Кількість МАФАНМ, в 1 г суміші	не більше $2,0 \times 10^3$	$3,5 \times 10^2$	$3,6 \times 10^2$
<i>Staphylococcus aureus</i> , у грамах суміші	не дозволено	не виявлений	не виявлений
<i>Bacillus cereus</i> , в 1 г суміші	не більше 50	1×10	1×10
Патогенні мікроорганізми, зокрема бактерії роду <i>Salmonella</i> , у 100 г суміші	не дозволено	не виявлено	не виявлено
<i>Listeria monocytogenes</i> , у 100 г суміші	не дозволено	не виявлена	не виявлена
Мікроскопічні гриби (пліснява), КУО в 1 г суміші	не більше 50	1×10	1×10
Дріжджі, КУО в 1 г суміші	не більше 10	1×10	1×10
<i>Cronobacter</i> spp (<i>Enterobacter sakazakii</i>) ¹	не дозволено	не виявлено	не виявлено
¹ – дослідження партії на <i>Cronobacter</i> spp (<i>Enterobacter sakazakii</i>) проводиться в разі виявлення <i>Enterobacteriaceae</i> у будь-яких зразках досліджуваного продукту, призначеного для споживання дітьми від народження до 6 місяців			

Отже, у результаті проведення досліджень мікробіологічних показників якості СМС для дитячого харчування удосконаленої технології встановлено, що мікробіологічна безпечність даного харчового продукту відповідає вимогам ТУ У 10.8-40573272-004:2023 [23]. Таким чином, вони є мікробіологічно безпечним продуктом харчування, що є особливою вимогою для дітей раннього віку в усьому світі.

Наступним етапом дослідження та оцінювання рівня безпечності збагачених СМС виробництва ТОВ «Хорольський завод продуктів дитячого харчування» було виявлення токсичних елементів (табл. 2 та рис. 1).

Таблиця 2

Результати досліджень токсичних елементів у СМС для дитячого харчування удосконаленої технології

Назва показника	Суміш суха молочна для харчування дітей класична	Рецептури	
		А	В
Кадмій, мг/кг	не більше 0,01	менше 0,0001	менше 0,0001
Свинець, мг/кг	не більше 0,05	менше 0,001	менше 0,001

Отже, узагальнюючи дані проведених досліджень у лабораторних умовах, варто підсумувати, що вміст токсичних елементів у зразках СМС для дитячого харчування удосконаленої технології виробництва ТОВ «Хорольський завод продуктів дитячого харчування» набагато нижчий гранично допустимих концентрацій та відповідає вимогам нормативних документів [23].

У даному дослідженні були виміряні і інші показники безпечності СМС для дитячого харчування удосконаленої технології, результати яких представлено в табл. 3.

Отже, результати проведених досліджень показують, що вміст меламіну, афлатоксину М1 та активність радіонуклідів цезію 137 та стронцію 90 у СМС для дитячого харчування удосконаленої технології у кілька разів нижчий за нормативні значення [23]. Тож цей продукт харчування є безпечним для споживання.

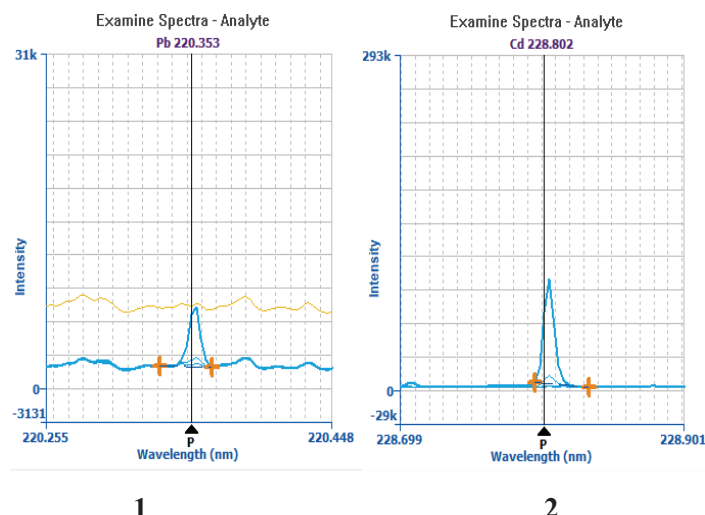


Рис. 1. Результати дослідження токсичних елементів у зразках СМС для дитячого харчування удосконаленої технології: 1 – свинець; 2 – кадмій

Таблиця 3

Результати досліджень показників безпечності СМС
для дитячого харчування удосконаленої технології

Назва показника	Суміш суха молочна для харчування дітей класична	Рецептури	
		А	В
Уміст меламіну, мг/кг	не більше 1,0	менше 0,05	менше 0,05
Афлатоксин М1,мкг/кг	не більше 0,025	менше 0,005	менше 0,005
Активність радіонуклідів, Бк/ кг: цезій ⁻¹³⁷ стронцій ⁻⁹⁰	не більше 40 не більше 5	5,77 3,46	5,28 3,17

Окрім того, результати проведених досліджень показників безпечності свідчать про високий рівень культури виробництва та дієвість упровадженої системи НАССР на ТОВ «Хорольський завод продуктів дитячого харчування».

Висновки. За результатами виконаної роботи проаналізовано встановлені вимоги європейських країн щодо якості та безпечності харчових продуктів, призначених для дітей, та стратегії зниження ризику забруднення сумішей молочних сухих для забезпечення найвищих стандартів їхньої якості.

На основі результатів дослідження показників безпечності сумішей сухих молочних для дитячого харчування, збагачених есенціальними жирними кислотами, було встановлено повну відповідність мікробіологічної безпечності даного харчового продукту вимогам ТУ У 10.8-40573272-004:2023, що є необхідною вимогою для дітей раннього віку в усьому світі.

За отриманими результатами визначення токсичних елементів, умісту меламіну, афлатоксину М1, активності радіонуклідів цезію⁻¹³⁷ та стронцію⁻⁹⁰ у зразках СМС для дитячого харчування удосконаленої технології ТОВ «Хорольський завод продуктів дитячого харчування» можна зробити висновок, що їх уміст набагато нижчий гранично допустимих концентрацій, відповідає вимогам нормативних документів і підтверджує безпечність для споживання.



Таким чином, результати проведених досліджень показників безпечності свідчать про високий рівень культури виробництва та дієвість упровадженої системи НАССР на ТОВ «Хорольський завод продуктів дитячого харчування».

Перспективою подальших досліджень є визначення показників безпечності СМС для дитячого харчування після певного терміну зберігання.

Список використаних джерел

1. Про затвердження Вимог до безпечності та окремих показників якості дитячого харчування : Наказ МОЗ України від 23.06.2022 № 1084. URL: <https://moz.gov.ua/uk/decrees/nakaz-moz-ukraini-vid-23062022--1084-pro-zatverdzhennja-vimog-do-bezpechnosti-ta-okremih-pokaznikiv-jakosti-ditjachogo-harchuvannja> (дата звернення: 28.03.2025).
2. Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006. Official Journal of the European Union. 2023. 119. P. 103–157.
3. Dietary exposures to food contaminants across the United States Environmental Research / C.P. Dougherty et al. 2000. 84 (2). P. 170–185.
4. Roman S., Sanchez-Siles L. A closer look at infant food safety: A comprehensive review comparing contaminants across different food sources. Food Control. 2025. Volume 169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.111018>.
5. Bioaccessibility data of potentially toxic elements in complementary foods for infants: A review Food Research International / E.L. de Paiva et al. 2023. 174, Article 113485. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113485>.
6. Associations among prenatal and postnatal arsenic, lead, and cadmium exposures and motor development in 3-year-old children: A longitudinal birth cohort study in Taiwan / C.B. Jiang et al. Environmental Science and Pollution Research. 2022. 29 (28). P. 43191–43200.
7. Heavy metals and neurodevelopment of children in low and middle-income countries: A systematic review PLoS One / Y.Y. Heng et al. 2022. 17 (3). DOI: 10.1371/journal.pone.0265536. eCollection 2022.
8. Association between heavy metals exposure and risk of attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) in children: a systematic review and meta-analysis / Q. Gu et al. European Child & Adolescent Psychiatry. 2024. 34(3). P. 921–941. DOI: 10.1007/s00787-024-02546-z.
9. Chatterjee M., Kortenkamp A. Cadmium exposures and deteriorations of cognitive abilities: Estimation of a reference dose for mixture risk assessments based on a systematic review and confidence rating. Environmental Health. 2022. 21 (1). P. 1–21.
10. Safety assessment of essential and toxic metals in infant Formulas. / H. Sipahi et al. The Turkish Journal of Pediatrics 2014. 56. P. 385–391. <https://turkjpediatr.org/article/download/1387/1380/1380>
11. Aflatoxin M1 Determination in Infant Formulae Distributed in Monterrey, Mexico / Quevedo-Garza et al. 2020. 12(2). DOI: 10.3390/toxins12020100.
12. Sharma S. Analysis and Quantification of melamine in Cow milk collected from different Milk Diaries using cation-exchange based liquid chromatography and tandem mass spectrometry. 2014. URL: <https://salo.li/5722D61>
13. Melamine-contaminated milk formula and its impact on children. Review Article. / Guo Wen Jian. Asia Pac J Clin Nutr. 2016. 25(4). P. 697–705.
14. Opinion of the Scientific Panel on Biological Hazards on a request from the Commission related to the microbiological risks in infant formulae and follow-on formulae. The EFSA Journal. 2004. 113. P. 1–35.
15. Safety assessment of essential and toxic metals in infant formulas / Hande Sipahi. The Turkish Journal of Pediatrics. 2014. 56. P. 385–391. URL: <https://turkjpediatr.org/article/download/1387/1380/1380>
16. Occurrence, sources, and pathways of chemical contaminants in infant formulas / Figueiredo de Mendonça Pereira B. Comprehensive reviews in food science and food safety. 2020. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12559>
17. ДСТУ 8446:2015. Продукти харчові. Методи визначення кількості мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів. [Чинний від 2017-07-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 16 с.
18. ДСТУ IDF 138:2003. Сухе молоко. Визначання Staphylococcus aureus. Методика підрахування колоній за температури 370C (IDF 138:1986. IDT) [Чинний від 2004-07-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 9 с.



19. ДСТУ 8040:2015. Продукти харчові. Метод виявлення та визначання *Bacillus cereus*. [Чинний від 2017-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 17 с.
20. ДСТУ EN ISO 11290–1:2022. Мікробіологія харчового ланцюга. Горизонтальний метод виявлення та підрахунку *Listeria monocytogenes* і *Listeria spp.* Частина 1. Метод виявлення (EN ISO 11290–1:2017, IDT; ISO 11290–1:2017, IDT). [Чинний від 2017-05]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2017.
21. ДСТУ 8447:2015. Продукти харчові. Метод визначення дріжджів і плісневих грибів. [Чинний від 2017-07-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 15 с.
22. Дослідження збагачених сухих молочних сумішей для дитячого харчування удосконаленої технології / Н.В. Будник та ін. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2025. Т. 36(75). № 2.
23. ТУ У 10.8 – 40573272-004:2023. Суміші сухі молочні для дитячого харчування. Технічні умови. [Чинний від 2023-01-01]. ХЗДПХ. 2023. 7 с.

Стаття надійшла до редакції 11.04.2025

N. Budnyk, O. Kalashnyk, A. Kainash, V. Nazarenko, V. Yukhno

Poltava State Agrarian University

SAFETY OF DRY MILK MIXTURES FOR BABY NUTRITION OF ADVANCED TECHNOLOGY

Summary

The aim of the article was to study the safety indicators of dry milk mixtures for baby food, enriched with essential fatty acids. The article analyzed information sources on the impact of pollutants on the health of infants. The scientific novelty is confirmed by studies of the safety indicators of the developed dry milk mixtures for baby food. The practical value of the results obtained is confirmed by the production of dry milk mixtures for baby food, enriched with essential omega-3 (formula A) and omega-6 (formula B) fatty acids at LLC Khorolsky Plant of Baby Food.

Based on the results of the study of the safety indicators of dry milk mixtures for baby food, enriched with essential fatty acids, it was established that the microbiological safety of this food product fully complies with the requirements of TU U 10.8-40573272-004:2023, which is a necessary requirement for young children all over the world.

According to the obtained results of the determination of toxic elements (cadmium less than 0.0001 mg/kg, lead – less than 0.001 mg/kg), the content of melamine (less than 0.05 mg/kg), aflatoxin M1 (less than 0.005 µg/kg), the activity of radionuclides cesium-137 (5.77; 5.28 Bq/kg) and strontium-90 (3.46; 3.17 Bq/kg) in samples of SMS for baby food of the improved technology of LLC «Khorolsky Plant of Baby Food Products», it can be concluded that their content is much lower than the maximum permissible concentrations, meets the requirements of regulatory documents and confirms safety for consumption.

Thus, the results of the conducted studies of safety indicators indicate a high level of production culture and the effectiveness of the implemented HACCP system at LLC «Khorolsky Plant of Baby Food Products».

Prospects for further research include determining the safety indicators of SMS for baby food after a certain storage period.

Keywords: standardization, quality, toxic elements, radionuclides, microbiological indicators, HACCP.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-29>

УДК 664.8:634.58:543.6

Л. П. Король-Безпала¹, канд. с.-г. наукІ. Ф. Безпалій¹, канд. с.-г. наукА. П. Король¹, канд. с.-г. наукЛ. В. Бондаренко¹, канд. вет. наукС. А. Наріжний¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-4362-3166

ORCID: 0000-0002-1038-1244

ORCID: 0000-0001-8079-7088

ORCID: 0000-0003-3751-9140

ORCID: 0000-0001-5478-3221

¹ Білоцерківський національний аграрний університет

e-mail: lesy25@ukr.net

АНАЛІЗ МІНЕРАЛЬНОГО СКЛАДУ АРАХІСУ, ЩО РЕАЛІЗУЄТЬСЯ В ТОРГОВЕЛЬНИХ МЕРЕЖАХ УКРАЇНИ

Анотація. Сьогодні у більшості українців спостерігається дисбаланс раціонів за білками, мінералами, поліненасиченими жирними кислотами, вітамінами та іншими поживними речовинами. Кожного дня людина, урахувавши її вік, рівень фізичної активності та вплив низки інших чинників, потребує деякої кількості калорій, які може отримати завдяки вживанню корисних харчових продуктів. Разом з енергією через їжу в організм надходять також важливі речовини: жири, білки, вуглеводи, вітаміни, харчові волокна, мінерали, пробіотики, біофлавоноїди. Перспективною сировиною для поповнення організму всіма необхідними поживними речовинами, які необхідні для підтримки здоров'я, є арахіс. У статті представлено результати дослідження мінерального складу арахісу виробників *Felix Peanuts*, *Козацька Слава*, *Big Bov*, що реалізуються в торговельних мережах України. Дослідження проводилися в умовах лабораторії ДНДКІ ветпрепаратів та кормових добавок (м. Львів). Уміст NH_4 , К, Na, Mg, Ca, S, P визначали за допомогою методики, викладеною у рекомендаціях за редакцією І.Я. Коцюмбаса за допомогою капілярного електрофорезу. Виявлено, що у складі арахісу жареному солоному міститься Амонію від 557,4 до 946,7 мг/100 г, Калію – від 816,8 до 877,6 мг/100 г, Натрію – від 33,0 до 59,0 мг/100 г, Магнію – від 203,6 до 225,2 мг/100 г, Кальцію – від 68,1 до 96,6 мг/100 г, Сульфору – від 490,0 до 560,0 мг/100 г, Фосфору – від 270,0 до 290,0 мг/100 г. Перспективними дослідженнями є вивчення амінокислотного складу в арахісі жареному солоному різних виробників.

Ключові слова: арахіс смажений солоний, мінеральний склад, дослідні зразки, харчовий продукт, виробники арахісу, здоров'я.

Постановка проблеми. Раціон людини сьогодення представлений багатогранним різноманіттям продуктів харчування рослинного походження (зернових, злакових та бобових, овочі та фрукти, спеції та приправи, горіхи та насіння), тваринного походження (молоко, м'ясо, яйця та продукти їх переробки) та гідробіонтів (риба, морепродукти, водорості тощо).

Останнім часом спостерігається зростання тенденції до здорового харчування, вегетаріанства, веганства та вживання різних органічних і безглютенних продуктів [1–3].

У населення час від часу змінюються харчові вподобання, але все більше споживачів вибирають якісні та безпечні продукти, які позитивно впливають на їхнє здоров'я. А тому виникає потреба у дослідженнях харчової цінності популярних продуктів. Одним із таких продуктів є арахіс, який найчастіше вживають у смаженому та підсоленому вигляді [4; 5].

Арахіс відноситься до родини бобових, насіння якого вирощують переважно для харчування. Його плоди містять у своєму складі велику кількість білків, вуглеводів, жирів, клітковини, мінералів різного характеру та певну кількість вітамінів різних груп завдяки основним властивостям у багатьох країнах світу використовується в приготуванні різних страв.

Проте арахіс є ще й алергеном для деяких людей, через що його слід уживати з обережністю, ураховуючи індивідуальні реакції, а тому дорослим рекомендується з'їдати трохи більше 30 г плодів на день [6–8].

Натомість, незважаючи на популярність даного продукту, існує недостатня кількість наукових досліджень щодо впливу термічної обробки та додавання солі на мінеральний склад ядер арахісу. Мінеральні речовини позитивно впливають на нормальне функціонування організму людини, а їх певний уміст виокремлює біологічну цінність самого харчового продукту.

Таким чином, аналіз мінерального складу смаженого солоного арахісу є актуальним із погляду його поживності та визначає можливі зміни, що відбуваються у процесі технологічної обробки. Це дає змогу поглибити наукові уявлення про якість даного продукту та сприятиме формуванню рекомендацій для споживачів і виробників [9; 10].

Аналіз останніх досліджень. Сьогодні арахіс є однією з найбільш поширених та улюблених культур, яку культивують по всьому світі: урожайність варіюється приблизно від 2 до 4 т/га (в Україні – від 0,5 до 1 т/га) [9; 11; 12].

За обсягом світового виробництва за період 2023–2024 рр. вирощування арахісу становило 51,318 млн т, де найбільші країни-виробники: США (2,9 млн т), Індія (7,1 млн т), Китай (19 млн т), Нігерія (4,3 млн т), Судан (2 млн т) та інші регіони (рис. 1) [13; 14].

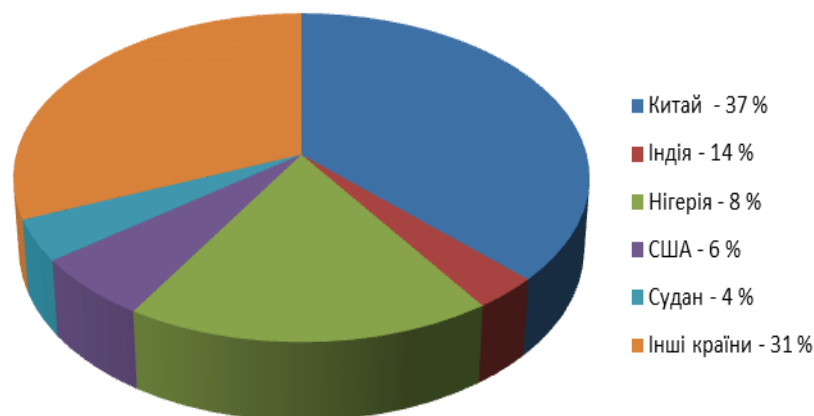


Рис. 1. Світове виробництво арахісу

У 2023–2024 рр. світовий попит на арахіс зріс порівняно з попередніми роками. Україна не забезпечує свої потреби, а тому імпортує здебільшого з країн Південної Америки.

Наукові дані, отримані впродовж останніх років, підтверджують, що арахіс, оброблений шляхом смаження та соління, зберігає значну частину мікро- і макроелементів, проте зазнає змін у своєму складі. Зокрема, вміст таких мінеральних елементів, як магній, фосфор, калій і цинк, залишається на відносно високому рівні навіть після термічної обробки [13; 15; 16].

Інформація, оприлюднена у Nutridex та FoodData Central, указує на те, що у 100 г смаженого солоного арахісу міститься у середньому така кількість мінеральних елементів: калій – 810 мг, фосфор – 410 мг, магній – 180 мг, кальцій – 37 мг, натрій – понад 400 мг, цинк – 2,9 мг, мідь – 0,54 мг, марганець – 1,9 мг, селен – 4 мкг [16; 17].

Наявність високих концентрацій мікроелементів, таких як цинк, мідь та марганець, свідчить про потенційну антиоксидантну активність арахісу та його сприятливий вплив на імунну систему й метаболічні процеси. У дослідженнях, опублікованих у журналі *Biomedical and Chemical Research Journal*, відзначено, що процес смаження може спричинити незначне зни-

ження концентрації окремих елементів, зокрема заліза та магнію, унаслідок дії високої температури та окислювальних реакцій [18].

Додавання кухонної солі значно підвищує уміст натрію, що має значення під час оцінки харчової безпеки для осіб із серцево-судинними захворюваннями, гіпертензією або хронічною нирковою недостатністю [19]. Таким чином, хоча смажений солоний арахіс зберігає високу біологічну цінність, його вживання повинно бути поміркованим, особливо для людей групи ризику.

Порівняльний аналіз з іншими горіхами (волоський горіх, мигдаль, кеш'ю) свідчить, що арахіс займає провідні позиції за вмістом магнію, фосфору та марганцю, що дає змогу класифікувати його як функціональний харчовий продукт із вираженим мінеральним потенціалом [20].

Формування мети статті. Метою дослідження є встановлення мінерального складу арахісу, що реалізується в торговельних мережах України.

Для дослідження були придбані зразки арахісу смаженого солоного, які продаються в різних торговельних мережах таких виробників: *Felix Peanuts*, *Козацька Слава*, *Big Bob* (рис. 2).



Рис. 2. Дослідні зразки арахісу

Лабораторні дослідження проводили в Державному науково-дослідному контрольному інституті ветпрепаратів та кормових добавок (м. Львів).

Уміст мінеральних елементів у 100 г арахісу визначали за описаною методикою у рекомендаціях за редакцією І.Я. Коцюмбаса за допомогою капілярного електрофорезу [21; 22].

Основна частина. Арахіс є багатим джерелом різних мінералів, які безпосередньо відіграють важливу роль у підтримці здоров'я.

Магній (Mg) відіграє багатогранну роль та є ключовим для роботи м'язів і нервів, а також підтримки імунної системи. Дефіцит магнію виражається у розширенні периферичних судин, прискореному пульсі та гіперемії.

Фосфор (P) важливий для формування кісток та зубів, а також для енергетичних перетворень в організмі. Він є частиною нуклеїнових кислот, ліпідів, протеїнів, гормонів, вітамінів, вуглеводів, ензимів. Нестача фосфору сприяє зменшенню концентрації неорганічного фосфору в сироватці крові.

Калій (K) сприяє регулюванню артеріального тиску, рівновазі рідини та діяльності м'язів, передаванню нервових імпульсів. Він головний катіон у внутрішньоклітинному просторі.



За дефіциту калію сповільнюється розвиток, фіксуються збої у роботі серця, погіршується бажання їсти, з'являється слабкість у тілі та інші негативні наслідки [23–26].

Кальцій (Ca) важливий для міцності кісток і зубів, а також для функціонування серця та м'язів. Майже третина всіх мінеральних елементів організму належить кальцію, який є одним із найпоширеніших мінералів у природі. За дефіциту кальцію виникає багато захворювань.

Амоній (NH₄) є позитивно зарядженою іонною формою аміаку і важливим постачальником азоту для рослин. В організмах амоній може утворюватися під час розпаду білків та амінокислот. Він є джерелом нітрогену, який забезпечує існування амінокислот.

Сульфур (S) є важливим елементом для всіх живих організмів, бо входить до складу амінокислот та вітамінів. Також відіграє ключову роль у метаболізмі й синтезі білків. Сульфур присутній у багатьох природних формах (сульфіди, сульфати, органічні сполуки). Дефіцит Сульфуру має великий вплив на метаболічні процеси.

Натрій (Na) – важливий електроліт, який регулює баланс рідини в організмі та бере участь у передачі нервових імпульсів. До організму натрій здебільшого потрапляє у вигляді хлориду натрію. За нестачі елемента відбувається зниження буферності крові, а також відбуваються окислювальні процеси [25; 27–29].

Усі ці мінеральні елементи мають велике значення як для рослин, так і для тварин і людей, оскільки вони беруть участь у великій кількості біохімічних процесів.

Результати досліджень умісту мінеральних речовин в арахісі смаженому солоному різних виробників наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Уміст мінеральних речовин в арахісі смаженому солоному, мг/100 г, $M \pm m$, $n = 3$

№ п/п	Показники	Виробники арахісу		
		Felix Peanuts	Козацька Слава	Big Bov
1	NH ₄ (амоній)	557,4 ± 0,23	675,1 ± 0,21	916,7 ± 0,19*
2	K (калій)	877,6 ± 0,04	816,8 ± 0,05	850,8 ± 0,04
3	Na (натрій)	37,0 ± 0,05	59,0 ± 0,05*	33,0 ± 0,03
4	Mg (магній)	228,5 ± 0,03	203,6 ± 0,04	225,2 ± 0,02
5	Ca (кальцій)	96,6 ± 0,18	68,1 ± 0,17	71,2 ± 0,16
6	S (сульфур)	510,0 ± 0,02	490,0 ± 0,01	560,0 ± 0,04
7	P (фосфор)	270,0 ± 0,04	280,0 ± 0,05	290,0 ± 0,05

Примітка: * $P \leq 0,05$

Експериментально встановлено, що арахіс смажений солоний має дуже великий мінеральний склад.

Найбільший уміст амонію виявлений у зразках арахісу *Big Bov*, який становить 916,7 мг/100 г. Також виявлено, що у зразках арахісу *Felix Peanuts* уміст цього елемента найменший порівняно з іншими дослідними зразками і становив 557,4 мг/100 г, що на 39,2% менше, ніж у арахісу *Big Bov*. Установлено, що вміст амонію арахісу *Козацька Слава* на 26,4% менший, аніж у *Big Bov*.

Необхідно відзначити, що вміст калію був найбільший у дослідних зразках горіхів фірми *Felix Peanuts* і становив 877,6 мг/100 г, що на 6,9% більше за показник в арахісі *Козацька Слава*. Також було встановлено, що вміст калію у продукті *Big Bov* був нижчим, аніж у *Felix Peanuts*, на 3,1%.

Також експериментально встановлено, що в арахісі смаженому солоному знаходиться великий уміст натрію. В арахісі *Козацька Слава* була найбільша кількість елемента, цей показник становив 59,0 мг/100. Порівнюючи з продукцією *Felix Peanuts* та *Big Bov*, показник був більшим відповідно у 1,6 та 1,8 рази.

Дослідження показали, що вміст магнію на 100 г продукту був найбільший у зразках горішків *Felix Peanuts* та становив 228,5 мг. Відповідно горішки *Козацька Слава* на 10,9% мали нижчий уміст елемента порівняно з арахісом *Felix Peanuts* – 203,6 мг. Аналогічно на 1,5% встановлено нижчий уміст магнію у продукті *Big Bov*.

Виявлено, що вміст кальцію був найбільший у зразках арахісу *Felix Peanuts* і становив 96,6 мг/100 г. Показник переважав результати, отримані у зразках виробників *Козацька Слава* і *Big Bov*, відповідно 29,5% та 26,3%.

Уміст Сульфуру на 100 г продукту був найбільший у зразках арахісу фірми *Big Bov* – 560,0 мг. Найнижчий показник результатів досліджень був у горішках *Козацька Слава* – 490,0 мг, різниця між ними становила 12,5%. Відповідно показник Сульфуру в арахісі фірми *Felix Peanuts* – 510 мг, що на 8,9% був менший, аніж в арахісі *Big Bov*.

Експериментально встановлено, що найбільша кількість фосфору була в арахісі смаженому солоному *Big Bov*, яка становила 290,0 мг мг/100. Показник переважав горішки зразків фірми *Felix Peanuts* та *Козацька Слава* на 6,9% і 3,5%.

Також було проведено графічний опис згідно з установленими результатами (рис. 3).

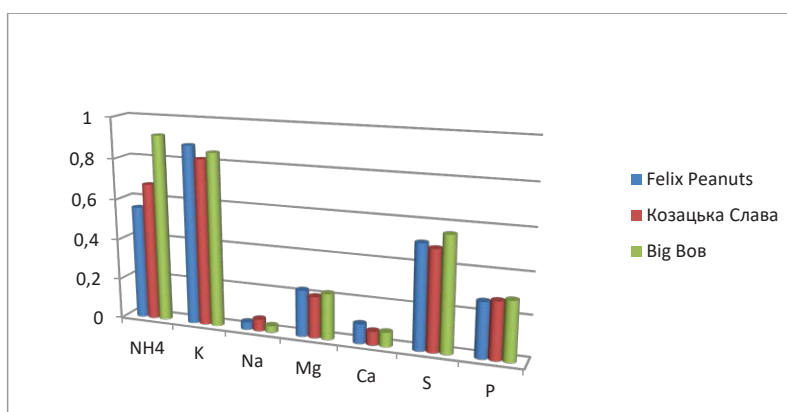


Рис. 3. Мінеральний склад арахісу смажено солоного, %

За візуальними даними з діаграми можна виділити такі елементи: арахіс смажений солоний виробництва *Big Bov* за вмістом Амонію (NH₄), Сульфуру (S), Фосфору (P) значно перевищує своїх конкурентів; за вмістом Магнію (Mg) знаходиться майже на рівні з виробником *Felix Peanuts*; арахіс виробництва *Козацька Слава* за кількістю Натрію (Na) перевищує інші торговельні марки, але має у своєму складі майже подібний уміст, а тому приваблює споживачів більш солонішим смаком.

Визначений мінеральний склад може змінюватися залежно від умов вирощування арахісу, обробки, зберігання, а також технологічного процесу виготовлення готового продукту. Тому рекомендуємо проводити регулярні дослідження для визначення точного вмісту мінералів.

Висновки.

1. Арахіс є дуже цінним компонентом, який має дуже високу харчову цінність, містить велику кількість вітамінів, мінералів, ненасичених кислот та інші не менш важливі елементи, що позитивно впливають на людський організм.

2. Також встановлено, що арахіс смажений солоний різних виробників, що реалізується в торговельних мережах України, містить у своєму складі на 100 г продукту Амонію – від 557,4 до 946,7 мг, Калію – від 816,8 до 877,6 мг, Натрію – від 33,0 до 59,0 мг, Магнію – від 203,6 до 225,2 мг, Кальцію – від 68,1 до 96,6 мг, Сульфуру – від 490,0 до 560,0 мг та Фосфору – від 270,0 до 290,0 мг.



Перспективним дослідженням є вивчення амінокислотного складу в арахісі жареному солоному різних виробників.

Список використаних джерел

1. Genome-Wide Discovery of Microsatellite Markers from Diploid Progenitor Species, *Arachis duranensis* and *A. ipaensis*, and Their Application in Cultivated Peanut (*A. hypogaea*) / C. Zhao et al. *Front. Plant Sci*, 2017. Vol. 8. P. 1209. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01209>
2. Potential Health Benefits of Plant Food-Derived Bioactive Components: An Overview / M. Samtiya et al. *Foods*, 2021. Vol. 10. 839 p. <https://doi.org/10.3390/foods10040839>
3. Державна служба статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua>
4. Identification of the Candidate Proteins Related to Oleic Acid Accumulation during Peanut (*Arachis hypogaea* L.) Seed Development through Comparative Proteome Analysis / H. Liu et al. *J Mol Sci*, 2018. Vol. 19(4). P. 1235. <https://doi.org/10.3390/ijms19041235>
5. Toomer O.T. Nutritional Chemistry of the Peanut (*Arachis hypogaea*). *Crit. Rev. Food Sci. Nutr*, 2018. Vol. 58. P. 3042–3053. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1339015>
6. Аналіз сортових ресурсів зернобобових овочевих культур в Україні / Н.О. Сиплива та ін. *Аграрні інновації*. 2024. Вип. 27. С. 93–108. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.27.14>
7. Федорчук В.Г., Каур Т.О. Історичне поширення арахісу, виготовлення масла та його використання. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Розвиток аграрної галузі та впровадження наукових розробок у виробництво»*, 18 листопада 2021 р. Миколаїв, 2021. С. 8–9.
8. Шаблия О.С., Рудь В.П., Косенко Н.П. Стан та перспективи розвитку галузі овочівництва в умовах війни. *Аграрні інновації*. 2023. Вип. 18. С. 136–142. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.18.19>
9. Analysis of Adoption of Improved Groundnut Varieties in the Tropical Legume Project (TL III) States in Nigeria / B. Ahmed et al. *Agricultural Sciences*, 2020. Vol. 11. P. 143–156. <https://doi.org/10.4236/as.2020.112009>
10. Дослідження хімічного складу та оцінка якості сортів арахісу, адаптованих до вирощування в Україні : монографія / А.А. Дубініна та ін. Харків : ХДУХТ, 2017. 101 с.
11. Любич В.В., Войтовська В.І. Технологічне оцінювання насіння сортів арахісу. *Вісник ЛТЕУ. Серія «Технічні науки»*. 2023. Вип. 34. С. 40–45. <https://doi.org/10.32782/2522-1221-2023-34-05>
12. Юрченко С.О., Шакалій С.М., Баган А.В. Вплив строків сівби на урожайність сортів арахісу (*Arachis hypogaea* L.). *Вісник ПДАА*. 2022. Вип. 2(2). С. 85–91. <https://doi.org/10.31210/visnyk2022.02.09>
13. Impact of Roasting and Extraction Methods on Chemical Properties, Oxidative Stability and Maillard Reaction Products of Peanut Oils / K. Suri et al. *J. Food Sci. Technol*, 2019. Vol. 56. P. 2436–2445. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03719-4>
14. Крамаренко О.С. Кухні країн світу : методичні рекомендації. Миколаїв, 2022. 70 с.
15. Kozioł M.J. Peanuts and their nutritional profile: Focus on mineral content. *International Journal of Food Science*, 2022. Vol. 57(4), P. 451–458.
16. Nutridex. Peanuts, roasted and salted. <https://www.nutridex.org.uk/foods/2kr5412/peanuts-roasted-and-salted>
17. U.S. Department of Agriculture. *FoodData Central*. <https://fdc.nal.usda.gov>
18. Adefemi S.O., Ogunleye, O.A. Effects of roasting on mineral composition of groundnut (*Arachis hypogaea*). *Biomedical and Chemical Research Journal*, 2023. Vol. 6(1). P. 112–119.
19. EatingWell. Are Peanuts Healthy? <https://www.eatingwell.com/article/7960613/are-peanuts-healthy/>
20. Tyagi P., Kalita D. Micronutrient composition in nuts: Comparative analysis. *Nutrients*, 2022. Vol. 14(8). P. 1675. [doi:10.3390/nu14081675](https://doi.org/10.3390/nu14081675)
21. Комбікорми, премікси, БВМД і сировина для їх виробництва. *Визначення вмісту калію, натрію, магнію, амонію і кальцію методом капілярного електрофорезу з використанням системи капілярного електрофорезу «Капель-105/105М» : методичні рекомендації* / І.Я. Коцюмбас та ін. ; за ред. І.Я. Коцюмбас. Львів, 2015. 27 с.
22. Комбікорми, премікси, БВМД і сировина для їх виробництва. *Визначення вмісту сульфатів і фосфатів методом капілярного електрофорезу з використанням системи капілярного електрофорезу «Капель-105/105М» : методичні рекомендації* / І.Я. Коцюмбас та ін. ; за ред. І.Я. Коцюмбас. Львів, 2015. 26 с.



23. Characterization of peanut seed oil of selected varieties and its application in the cereal-based product / M. Bilal et al. *J Food Sci Technol*, 2020. Vol. 57(11). P. 4044–4053. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04437-y>
24. Sogut T., Ozturk F., Kizil S. Effect of sowing time on peanut (*Arachis hypogaea* L.) cultivars: Fatty acid composition. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2016. Vol. 10. P. 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.09.018>
25. Біологічно активні речовини арахісу культурного / С.В. Романова та ін. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Planta + Наука, Практика та освіта»*. Київ, 2021. С. 165–169.
26. Органолептичні показники та харчова цінність арахісу смаженого мережі готельно-ресторанних комплексів Київської області / Л.П. Король-Безпала та ін. *Науковий вісник ЛНУ ветеринарної медицини та біотехнологій. Серія «Харчові технології»*. 2021. Вип. 23(96). С. 15–18. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9603>
27. Antioxidant, anti-inflammatory and anti-septic potential of phenolic acids and flavonoid fractions isolated from *Lolium multiflorum* / K.C. Choi et al. *Pharm. Biol*, 2017. Vol. 55(1). P. 611–619. <https://doi.org/10.1080/13880209.2016.1266673>
28. Hot Air Drying of *Sipunculus nudus*: Effect of Microwave-Assisted Drying on Quality and Aroma / Y. Dai et al. *Foods*, 2023. Vol. 12. 733 p. <https://doi.org/10.3390/foods12040733>
29. Любич В.В., Войтовська В.І. Жирнокислотний склад насіння різних сортів арахісу та його харчова цінність. *Збірник наукових праць Уманського НУС*. 2022. Вип. 1(100). С. 34–40. <https://doi.org/10.31395/2415-8240-2022-100-1-34-40>

Стаття надійшла до редакції 18.04.2025

L. Korol-Bezpal¹, I. Bezpal¹, A. Korol¹, L. Bondarenko¹, S. Narizhnyy¹

¹*Bila Tserkva National Agrarian University*

ANALYSIS OF MINERAL STOCK OF PEANUTS SOLD IN UKRAINIAN RETAIL NETWORKS

Summary

Today, most Ukrainians have an imbalance in their diets for proteins, minerals, polyunsaturated fatty acids, vitamins and other nutrients. Along with energy, important substances also enter the body through food, namely: fats, proteins, carbohydrates, vitamins, dietary fiber, minerals, probiotics, bioflavonoids. Consumers also acquire certain knowledge thanks to carefully developed information about the composition, action and properties of various products. Peanuts are a promising raw material for replenishing the body with all the necessary nutrients needed to maintain health. Peanuts are a source of vitamins and minerals that have a good effect on the functioning of the heart, liver, nervous system, and other organs. Due to its fibrous structure, the nut is useful for some types of cancer. However, large amounts of peanut consumption can cause allergic reactions, gastrointestinal disorders, and obesity. The article presents the results of a study of the mineral composition of peanuts from manufacturers *Felix Peanuts*, *Kazatskaya Slava*, *Big Boy*, sold in retail chains in Ukraine. The studies were conducted in the laboratory of the SRCI of Veterinary Preparations and Feed Additives (Lviv). The content of NH₄, K, Na, Mg, Ca, S, P was determined using the method described in the recommendations edited by I.Ya. Kotsumbas using capillary electrophoresis. It was found that salted peanuts contain ammonium from 557,4 to 946,7 mg/100 g, potassium from 816.8 to 877.6 mg/100 g, sodium from 33,0 to 59,0 mg/100 g, magnesium 2,0, calcium from 68,1 to 96,6 mg/100 g, sulphur from 490,0 to 560,0 mg/100 g, and phosphorus from 270,0 to 290,0 mg/100 g. Promising research is the study of the amino acid composition in peanuts coated with salt from different manufacturers.

Keywords: roasted salted peanuts, mineral composition, experimental samples, food product, peanut manufacturers, health.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-30>

УДК 621.646

Р. Ю. Кравченко¹, аспірант

ORCID: 0000-0002-3309-9962

І. Я. Стадник¹, докт. техн. наук

ORCID: 0000-0003-4126-3256

В. А. Піддубний², докт. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1497-7133

Я. В. Євчук³, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-8624-3825

¹Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя²Державна наукова установа «Український науково-дослідний інститут спирту та біотехнології харчових продуктів»³Уманський національний університет

e-mail: igorstadnykk@gmail.com

МОДИФІКАЦІЯ БУРЯКОВОГО КВАСУ РОСЛИННОЮ СИРОВИНОЮ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ТІСТА ТА ХЛІБА

Анотація. У статті досліджено вплив додавання насіння льону, калини, молочної сироватки та житньо-пшеничних сухариків на хімічний склад під час настоювання бурякового квасу. Метою роботи є дослідження впливу на квас додаткових компонентів щодо біохімічних та фізико-хімічних властивостей. Приготування квасу проведено згідно з розробленою технологією. Ферментація квасу збагатила мінералами (калій, магній, залізо), вітамінами (С, В₆, фолієвою кислотою) та пігментами, зокрема бетаніном, що надає квасу червоний колір. Це дало змогу підвищити харчову цінність квасу та позитивно вплинути на органолептичні характеристики хліба, зокрема смак, колір та текстуру. Молочна сироватка сприяла поліпшенню процесу ферментації та створенню сприятливих умов для утворення корисних сполук. Представлені результати збагачення бурякового квасу рослинними добавками дали змогу не лише покращити його смакові та фізико-хімічні властивості, а й зробити хлібобулочні вироби більш корисними для здоров'я.

Ключові слова: буряковий квас, рослинні добавки, хлібобулочні вироби, органолептичні властивості, біоактивні речовини, технологія ферментації.

Постановка проблеми. Упродовж останніх років зростає зацікавленість населення у веденні здорового способу життя, що, своєю чергою, сприяє формуванню нових харчових пріоритетів. Споживачі дедалі більше звертають увагу на харчову цінність продуктів, віддаючи перевагу їжі, яка позитивно впливає на загальний стан здоров'я [1; 2]. Уживання продуктів, багатих на біологічно активні речовини, сприяє зміцненню імунної системи, покращенню когнітивної функції, фізичної витривалості та профілактиці хронічних захворювань [3].

Такі зміни в уподобаннях споживачів стимулюють наукову спільноту та виробників харчових продуктів до пошуку інноваційних рішень, спрямованих на створення функціональних харчових продуктів із залученням природних інгредієнтів, мінімально обробленої сировини та екологічно сталих технологій. Особливе місце у цьому процесі посідає використання рослинної сировини у виробництві хлібобулочних виробів. Її застосування зумовлене не лише відновленням інтересу до традиційних рецептур, а й прагненням покращити поживний склад готової продукції без використання синтетичних добавок.

Аналіз останніх досліджень. Рослинні компоненти та побічні продукти їх переробки цінуються за високий вміст харчових волокон, поліфенолів та інших антиоксидантів, що сприяють зниженню окисного стресу в організмі [2; 3]. Їх включення до складу хлібобулочних виробів дає змогу не лише підвищити біологічну цінність продукції, а й покращити її функціональні властивості, зберігаючи при цьому традиційний смак і зовнішній вигляд.



Однією з ключових переваг використання рослинної сировини у хлібопекарських технологіях є можливість створення виробів із характерним природним забарвленням – від ніжно-рожевого до глибокого червонуватого тону, залежно від виду та концентрації доданих інгредієнтів. Такі вироби вирізняються привабливою структурою: м'якою, пружною та добре розвиненою пористістю, що значно підвищує його споживчу цінність [4].

Застосування рослинних компонентів відповідає сучасному попиту на натуральну, екологічно чисту й функціональну продукцію, водночас відкриваючи нові можливості для розширення асортименту хлібобулочних виробів. На тлі зростання інтересу до здорового харчування та збереження традицій спостерігається тенденція до відновлення автентичних технологій, які попри більшу трудомісткість забезпечують вищу смакову якість, збереження біологічно активних речовин і натуральний склад готової продукції [4; 5].

У хлібопекарській галузі сучасні технології дедалі активніше спрямовуються на впровадження інновацій, зокрема у сфері функціонального збагачення готової продукції [6]. Серед натуральних джерел корисних речовин особливе місце займають овочеві добавки у формі порошків, паст, соків, настоїв, пюре або цукатів [7]. Такі компоненти є природними носіями вітамінів, мінералів, харчових волокон, антиоксидантів та інших біоактивних сполук, які позитивно впливають на стан здоров'я. Завдяки цьому хліб не лише збагачується на корисні речовини, а й набуває привабливого кольору, аромату та смаку.

До найпоширеніших овочевих інгредієнтів, які використовують у хлібопекарській практиці, належать порошки з моркви, гарбуза, шпинату, томатів, часнику, буряка та інших овочів [5; 8]. Так, буряковий сік, за даними [9; 10], виступає ефективним натуральним барвником, що також підвищує антиоксидантну активність хліба. Морквяний порошок, як показано в роботах [7; 8], є цінним джерелом каротиноїдів і може додавати легкий солодкуватий присмак готовому виробу. Додавання шпинатного порошку збагачує продукт хлорофілом, який має антиоксидантну дію та підтримує імунну систему.

Аналогічно, перспективним напрямом є використання перероблених продуктів плодово-ягідної сировини, зокрема яблук, чорниці, журавлини та інших культур, багатих на поліфенольні сполуки. Їх застосування дає змогу створювати функціональні хлібобулочні вироби з підвищеним умістом антиоксидантів і біофлавоноїдів. Додавання ягідних порошків, паст або екстрактів не лише збагачує продукт біологічно активними компонентами, а й покращує його смакові, ароматичні та структурні властивості, підвищуючи привабливість для споживачів [8; 11].

Особливий науковий інтерес становлять ферментовані овочеві інгредієнти, такі як буряковий квас або сік, які містять органічні кислоти, пробіотичні мікроорганізми та метаболіти, що здатні поліпшувати аромат, текстуру та збереження виробу [9; 10]. Використання таких ферментованих компонентів у поєднанні з плодово-ягідною сировиною дає змогу отримати хлібобулочні вироби з покращеними органолептичними характеристиками, збільшеним терміном зберігання та підвищеною функціональною цінністю [11].

Однією з таких перспективних традицій є виробництво хліба з використанням продуктів переробки столового буряка. Столовий буряк викликає значний інтерес у контексті підвищення харчової цінності продуктів масового споживання. Цей овоч є цінним джерелом харчових волокон, вітамінів, мікроелементів та амінокислот, що зумовлює його особливу роль серед рослинної сировини для збагачення харчових виробів [12].

За результатами досліджень, представлених у роботі [10], використання соку, отриманого з продуктів переробки столового буряка, позитивно впливає на органолептичні характеристики готової продукції, зокрема колір, аромат, текстуру та структуру. Водночас, згідно з даними [9; 13; 14], для забезпечення стабільної якості бурякового квасу як інгредієнта у хлібопекарській

промисловості необхідна оптимізація технологічних параметрів його ферментації, зокрема тривалості, температури та вологості процесу. Упровадження таких заходів дає змогу підвищити якісні показники квасу, що, своєю чергою, сприяє покращенню властивостей хлібобулочних виробів під час його використання у рецептурах.

Особливої уваги потребує уміст харчових волокон, який хоча й позитивно впливає на здоров'я, істотно змінює технологічні властивості тіста. Висока концентрація клітковини часто призводить до утворення тіста з підвищеною жорсткістю та зниженою еластичністю, що ускладнює процеси його обробки, формування та випікання [11; 14]. Такі зміни також можуть позначитися на органолептичних властивостях готової продукції, що іноді не відповідає очікуванням споживачів, звиклих до традиційного пшеничного хліба з м'якою структурою та нейтральним смаком. Окрім того, фізико-хімічні особливості окремих рослинних добавок можуть негативно впливати на об'єм, пористість і збереження якості хлібобулочних виробів під час зберігання, що обмежує їх широке використання без відповідної технологічної адаптації [12; 13; 15].

Формулювання мети статті. Метою роботи є дослідження впливу додаткових компонентів: льону, калини, молочної сироватки та житньо-пшеничних сухариків на біохімічні та фізико-хімічні властивості квасу, виготовленого з продуктів переробки столового буряка. Головним завданням було визначення зміни біохімічних та фізико-хімічних властивостей квасу. Додатково необхідно встановити ступінь впливу приготовленого квасу на вироби.

Матеріали та методи. Процес приготування бурякового квасу ґрунтувався на симбіотичній взаємодії хімічного складу столового буряка, доданих компонентів рослинного походження та присутніх мікроорганізмів, зокрема дріжджів. Унаслідок цього відбувалися біохімічні перетворення, що суттєво впливали на органолептичні, біохімічні та фізико-хімічні властивості квасу.

Основна рецептура приготування квасу передбачала таке співвідношення: 1 частина нарізаного буряка (кубики 2–3 см або тонкі скибки) до 3–4 частин води. Оптимізація технологічних параметрів здійснювалася за таких умов: 0,5 л води; 200 г буряка; температура води – 25°C; 5% молочної сироватки; 10 г насіння льону; 200 г житньо-пшеничних сухариків; 10 г порошку калини.

Для забезпечення активного бродіння молочну сироватку підігрівали до 30–35°C із метою стимуляції молочнокислих бактерій. Насіння льону попередньо замочували у 100 мл води температурою 40–50°C на 15–20 хв для утворення слизової фракції, яку згодом додавали до основної маси. Житньо-пшеничні сухарики підсушували в духовці за температури 150°C протягом 5–10 хв із метою активізації дріжджів. Порошок калини змішували з 30–40 мл теплої води для забезпечення рівномірного розподілу в суміші.

Ферментація здійснювалася за температури 25–30°C. У перші 12 годин розчин періодично перемішували для забезпечення доступу кисню. Для активації процесу бродіння додавали 1 чайну ложку (≈ 5 г) цукру на 0,5 л суміші. Тривалість ферментації залежала від температурного режиму: при 25°C – 48–72 години, при 30°C – 36–48 годин.

Ємність із квасом накривали марлею для запобігання потраплянню сторонніх часток і забезпечення відведення вуглекислого газу.

Уміст вітаміну С визначали йодометричним методом за методикою Тілмана. Метод ґрунтується на титруванні аскорбінової кислоти розчином йоду у присутності крохмалю як індикатора. Результати виражено в мг/100 мл продукту. Уміст вітаміну В₆ та фолієвої кислоти визначали спектрофотометричним методом після попереднього мінералізування зразків [14]. Вимірювання проводили на спектрофотометрі за довжини хвилі 290 нм для вітаміну В₆ та 280 нм для фолієвої кислоти. Визначення проводили методом високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ) із використанням детектора УФ-випромінювання. Ідентифікацію кислот здійснювали за допомогою стандартних зразків. Мінеральний склад визначали методом атомно-абсорбцій-

ної спектрофотометрії (ААС) після мінералізації зразків концентрованою азотною кислотою. Уміст калію також оцінювали фотометричним методом із використанням полум'яного детектора. Загальну кислотність визначали титруванням зразка 0,1 Н розчином гідроксиду натрію (NaOH) до появи стійкого рожевого забарвлення у присутності фенолфталеїну як індикатора [13; 14]. Органолептичну оцінку проводили дегустаційною комісією за 5-бальною шкалою, ураховуючи показники смаку, аромату, кольору, прозорості та загального враження [12].

Основна частина. Процес ферментації квасу залежить не лише від складу сировини та співвідношення буряка і додаткових інгредієнтів, а й від таких чинників, як температура і тривалість настоювання. Ферментація як давній біотехнологічний процес завдяки введенню рослинних компонентів сприяла покращенню сенсорних і функціональних властивостей квасу, а також змінила його біохімічний та ароматичний профіль [14; 15].

Аналіз отриманих даних свідчить про високий уміст молочної кислоти (210 мг на 100 мл) та калію (140 мг на 100 мл), що зумовлено активною молочнокислою ферментацією та внеском калійвмісних рослинних компонентів. Оцтова (65 мг на 100 мл) та лимонна (35 мг на 100 мл) кислоти також були виявлені у значних кількостях, що свідчить про комплексний характер ферментаційних процесів.

Під час ферментації відбулося активне вивільнення вітамінів, мінералів та органічних кислот, які не лише покращують смак і аромат квасу, а й сприяють підвищенню якості борошняної продукції. Серед вітамінів найвищий уміст зафіксовано для вітаміну С (12,5 мг на 100 мл), який є важливим антиоксидантом. Помірні концентрації вітаміну В₆ (0,9 мг на 100 мл) та фолієвої кислоти (0,15 мг на 100 мл) свідчать про збагачення продукту функціональними мікроелементами завдяки додаванню калини та сироватки. Мінеральний склад характеризується наявністю заліза (0,6 мг на 100 мл), магнію (11,2 мг на 100 мл) та калію, які відіграють ключову роль у підтримці електролітного балансу й ферментативної активності. Порівняльний аналіз фізико-хімічних властивостей бурякового квасу, приготованого з різними добавками, подано в таблиці.

Таблиця 1

Фізико-хімічні характеристики бурякового квасу з різними добавками

Параметр	Буряковий квас (конт-рольний)	Квас з льоном	Квас з калиновим порошком	Квас з молочною сироваткою	Квас з житньо-пшеничними сухариками
Кислотність (pH)	3.5–4.0	3.3–3.7	3.2–3.6	3.4–3.8	3.3–3.7
Вологовміст (%)	92–94	91–93	90–92	91–93	91–94
Вміст органічних кислот (г/л)	4.5–5.0	4.8–5.2	4.6–5.1	4.7–5.3	4.6–5.0
Ферментативна активність (U/g)	150 – 170	160–180	155–175	165–185	160–170
Загальна кількість антиоксидантів (мг/100 г)	50–60	55–65	70–80	60–70	55–65
Смакова оцінка	Середня кислинка, традиційний смак	М'яка кислинка, з легким присмаком льону	Легкий ягідний смак, з характерною кислинкою	Легкий молочний смак, з підвищеною м'якістю	Складний смак з ароматом підсмажених сухариків
Вплив на якість хліба	Традиційний смак і текстура	Покращена м'якість хліба, додаткова пружність	Підвищена антиоксидантна активність, покращена зберіганість	Підвищена еластичність та вологостійкість властивості	Покращений смак і аромат, поліпшене зберігання



Взаємодія хімічного складу буряка з доданими рослинними інгредієнтами та дріжджами відіграла ключову роль у формуванні цього профілю. Цей процес охоплює як конкуренцію, так і симбіоз між різними мікроорганізмами, що визначає інтенсивність утворення органічних кислот, спиртів, складних ефірів і кетонів, які формують характерний смак та аромат квасу.

Упродовж ферментації білки частково розщеплюються, що не лише поліпшує текстуру, а й забезпечує кращу засвоюваність продукту. Активність фітази мікрофлори стимулює ефективніше засвоєння мінералів, таких як кальцій і магній, що позитивно впливає на харчову цінність квасу. Леткі сполуки, що утворюються у процесі ферментації, формують характерну кислотність, яка впливає на смакові властивості та якість хлібобулочних виробів, виготовлених на основі квасу.

Зрілість квасу є важливим показником, оскільки вона визначає не лише кислотно-ферментативні властивості, а й структурно-механічні характеристики тіста. Мікробіологічні та біохімічні зміни, що відбуваються під час ферментації, можуть суттєво вплинути на стабільність хліба під час зберігання, зокрема завдяки поліпшенню структури тіста та змінам кислотно-лужного балансу.

Білки та мінерали, що містяться у молочній сироватці, підвищують еластичність і вологостримувальні властивості тіста. Це дає змогу отримати хліб м'яким і свіжим навіть за тривалого зберігання. Молочнокислі бактерії, що активувалися в процесі ферментації, також можуть сприяти стабільності хлібобулочних виробів, знижуючи ризик розвитку шкідливих мікроорганізмів і підвищуючи загальну мікробіологічну безпеку [10; 16]. Зрілість квасу є важливим показником, оскільки вона визначає не лише кислотно-ферментативні властивості, а й структурно-механічні характеристики тіста. Мікробіологічні та біохімічні зміни, що відбуваються під час ферментації, можуть суттєво впливати на стабільність хліба під час зберігання, зокрема завдяки поліпшенню структури тіста та зміні кислотно-лужного балансу.

Житньо-пшеничні сухарики надали не лише ароматичних переваг, а й сприяли активізації ферментаційних процесів, що, своєю чергою, покращує структуру хліба [12; 17]. Сухарики як джерело додаткових ферментів та органічних кислот впливають на кислотність готового виробу, сприяючи його кращому збереженню. Підвищена кислотність допомагає знизити швидкість розвитку патогенних мікроорганізмів, що також забезпечує триваліший термін зберігання хліба [18].

У процесі ферментації квасу значну роль відіграли дріжджі, які сприяли перетворення цукрів на органічні кислоти та інші біоактивні речовини. Це сприяло утворенню продуктів зі специфічними смаковими характеристиками, таких як кислинка та аромат, що позитивно впливає на якість хліба. Додавання таких компонентів, як молочна сироватка, льон, калина або житньо-пшеничні сухарики, надали квасу не тільки корисні речовини, а й поліпшили його функціональні характеристики.

Так, молочна сироватка містить лактозу, що є джерелом додаткової енергії для мікроорганізмів, і кальцій, який позитивно впливає на текстуру тіста [16]. Льон і калина завдяки високому вмісту антиоксидантів можуть значно підвищити термін зберігання продукції, знижуючи ризик псування через окислювальні процеси [17]. Ураховуючи результати наших досліджень, можна стверджувати, що додавання цих компонентів до квасу не тільки покращує смакові якості, а й позитивно впливає на його зберігання.

Вітамін С, який є важливим антиоксидантом, а також вітамін В₆ і фолієва кислота, можуть покращити не лише здоров'я споживача, а й зберігання хлібобулочних виробів, запобігаючи їх швидкому старінню [18]. Подібні результати спостерігалися у дослідженні [19], де виявлено, що використання ферментованих компонентів, збагачених біоактивними речовинами, значно підвищує термін зберігання хлібобулочних виробів.



Що стосується фізико-хімічних властивостей квасу, то додавання різних компонентів вплинуло на кислотність, мікробіологічну стабільність та в'язкість продукту. Так, підвищена кислотність квасу, яка досягається завдяки органічним кислотам, створює сприятливі умови для розвитку корисних мікроорганізмів, що забезпечує додаткові функціональні властивості, такі як пробіотичні ефекти. Окрім того, цей чинник сприяє підвищенню якості пористості та текстури тіста, що визначає м'якість і еластичність готового хліба [20].

Інтерес викликає й питання тривалості зберігання хлібобулочних виробів, виготовлених на основі бурякового квасу з додатковими рослинними компонентами. Збагачення хліба органічними кислотами й антиоксидантами може сприяти його кращому збереженню порівняно з традиційними рецептами, оскільки ці компоненти не лише покращують його смакові якості, а й уповільнюють процеси старіння та псування продукту. Як зазначається у роботах [11; 17; 18], саме органічні кислоти, що утворюються під час ферментації, сприяють більш тривалому збереженню свіжості хліба.

Загалом представлені дані підтверджують доцільність збагачення бурякового квасу рослинними компонентами, що забезпечує не лише покращення смакових характеристик, а й підвищення його функціональної цінності. Застосування різноманітних рослинних добавок до бурякового квасу має великий потенціал для поліпшення якості як самого квасу, так і хлібобулочних виробів. Це сприяє розробленню продуктів, які не лише мають унікальні смакові та ароматичні властивості, а й забезпечують споживачам функціональні переваги завдяки збагаченню корисними речовинами.

Висновки. У результаті проведених досліджень додавання різних рослинних компонентів, таких як насіння льону, калини, молочної сироватки та житньо-пшеничних сухариків, забезпечило не лише збагачення квасу біоактивними речовинами, такими як вітаміни, мінерали, органічні кислоти, а й поліпшило його функціональні властивості. Так, кислотність квасу безпосередньо впливає на бродильні процеси та смакові якості хліба, а вологовміст квасу має прямий вплив на здатність хліба утримувати вологу, що є важливим для збереження свіжості хлібобулочних виробів.

Органічні кислоти, утворені під час ферментації, сприяють розвитку кислинки у хлібі та можуть покращувати його смакові властивості. Висока ферментативна активність сприяє поліпшенню бродіння і м'якості хліба, впливаючи на його текстуру та об'єм. Антиоксиданти, зокрема вітаміни та флавоноїди, дають змогу зберігати свіжість хліба, уповільнюючи процеси окислення і зменшуючи ризик псування продукту.

Подальші дослідження у цій галузі можуть зосередитися на вивченні впливу різних співвідношень буряка та рослинної сировини на кінцеві властивості квасу та хлібобулочних виробів, а також на вдосконаленні технології ферментації для максимального збереження корисних властивостей продукту. Цей підхід є предметом подальших досліджень для розроблення інноваційних рецептур хлібобулочних виробів, які відповідають вимогам сучасних споживачів щодо функціонального харчування, здорового способу життя та екологічної безпеки.

Список використаних джерел

1. Mazorenko D., Mazneva G. Table beets: progressive technologies and cost standards. Kharkiv: Miskdruk publishing house. 2011. 28 p.
2. Tetiana Lisovska, Igor Stadnik, Volodymyr Piddubnyi, Nina Chorna Effect of extruded corn flour on the stabilization of biscuit dough for the production of gluten-free biscuit. *Ukrainian Food Journal* 2020. Volume 9, Issue 1 Kyiv, P. 159–174.
3. Lachowicz S., Świeca M., Pejcz E. Improvement of health-promoting functionality of rye bread by fortification with free and microencapsulated powders from amelanchier *alnifolia* nutt. *Antioxidants*. 2020. Vol. 9, no. 7. P. 614. URL: <https://doi.org/10.3390/antiox9070614>



4. Kravchenyuk R. Yu., Kravchenyuk H. Yu., Stadnyk I. Ya., Sabadash G. The effect of roller crushing of germinated flax seeds on the quality indicators of «Ternopilske» cookies // *Bulletin of the TNTU*, 2024, No. 2(114), P. 51–59.
5. Igor Stadnyk, Olena Kolomiets, Oksana Dziana Substantiation of foamy structure formation in a gluten-free biscuit *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences* vol. 14, p. 2020. 1008–1019. <https://doi.org/10.5219/1399>
6. Kapitanova T., Koshulko V., Oleksienko V. Use of legume seeds and their processing products to improve the quality and nutritional value of bakery products. *Dmytro Motorny Tavri State Agro-Technological University*. 2021. P. 188–190.
7. Samilyk M., Helikh A., Ryzhkova T., Bolgova N., Nazarenko Y. Influence of the structure of some types of fillers introduced to the yogurt recipe on changes in its rheological indicators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2, 2020. No 11(104). P. 46–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199527>
8. Samilyk M., Helikh A., Bolgova N., Ryzhkova T., Sirenko I., Fesyun O. Substantiation of the choice of fillers for cottage cheese mass. *EUREKA: Life Sciences*. 2020. Vol. 3. P. 38–45. DOI: 10.21303/2504-5695.2020.001210
- Kravchenyuk R. Stadnyk I., Technology of preparation and determination of properties of kvass from table beet for use in bread baking *Human and nation's health*, 10. Karpyk, M. Kukhtyn, V. Selskyi, I. Nazarko, O. Pokotylo, M. Haidamaka (2021) Research of technological properties of bread made with the addition of beet kvass. *Scientific Messenger LNUVMB. Series: Food Technologies*, 2024. vol. 23, 3–7 <https://nvlvet.com.ua/index.php/food>
11. Drobot V.I., Sylchuk T.A. Using spontaneous fermentation sourdough in the production of rye-wheat bread. *Naukovi pratsi NUXT – Scientific works of NUFT*, 2016. 22(1), 180–184.
12. Drobot, V.I., & Izhevskaya, O.P. The use of flaxseed meal to give bread health properties, *Grain Storage and Processing*, 2017. Vol. 209, no. 1, P. 47–49.
13. Rudavska G.B., Mandrika V.I. Microbiology. Laboratory practicum for students in the field of training 0503 «Trade» (educational and methodical edition), KNTEU. Kyiv: CPNMV KNTEU, 2008. 82 p.
14. Rudavska G.B., Demkevich L.I. Microbiology. Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption: textbook 2nd ed., revised. and added. K.: Kyiv. national trade and economy university, 2005. 407 p.
15. Stadnyk Igor, Piddubnyi Volodymyr, Chahaida Andrii, Fedoriv Viktor, Hushtan Tetiana, Kraievska Svitlana, Kahanets-havrylko Lesia, Okipnyi Ihor (2023). Energy saving thermal systems on the mobile platform of the mini-bakery. *Contents of Journal of Mechanical Engineering – Strojnický časopis*, Volume 73, No. 1. P. 169 – 186. DOI: 10.2478/scjme-2023-0014.
16. Palamarchuk I.I. Growth, development and yield of table beet using water-retaining granules in the conditions of the forest-steppe of the right bank of Ukraine. *Vegetable and melon growing*. 2021. Vol. 70. P. 45–52.
17. Savchenko O., Kalinichenko Y. Technology of manufacturing rye and wheat sourdough bread with the use of basil. *Technical sciences and technologies*, 2019. 4(18), 183–191. DOI: 12.25140/2411-5363-2019-4(18)-183-191.
18. Zheplinska M., Mushtruk M., Vasylyv V., Kuts A., Slobodyanyuk N., Bal-Prylypko L., Nikolaenko M., Kokhan, O., Reznichenko Y., Salavor O. The micronutrient profile of medicinal plant extracts. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2021. 15, 528–535. doi.org/10.5219/1553

Стаття надійшла до редакції 23.04.2025

R. Kravchenyuk¹, I. Stadnyk¹, V. Piddubny², Ya. Yevchuk³

¹*Ternopil Ivan Pulyuy National Technical University*

²*State Scientific Institution Ukrainian Research Institute of Alcohol and Biotechnology of Food Products*

³*Uman National University*

MODIFICATION OF BEET KVAS WITH VEGETABLE RAW MATERIALS TO IMPROVE THE QUALITY OF DOUGH AND BREAD

Summary

The article investigates the effect of adding flax seeds, viburnum, whey and rye-wheat crackers on the chemical composition of beet kvass during infusion. Therefore, the aim of the work was to study the effect of additional components on kvass in terms of biochemical and physicochemical properties. Kvass was prepared according to



the developed technology. Fermentation of kvass enriched it with minerals (potassium, magnesium, iron), vitamins (C, B6, folic acid) and pigments, in particular betanin, which gives kvass its red color. This increased the nutritional value of kvass and positively affected the organoleptic characteristics of bread, including taste, color and texture. Whey contributed to improving the fermentation process and creating favorable conditions for the formation of beneficial compounds. The presented results of enrichment of beet kvass with herbal additives allowed not only to improve its taste and physicochemical properties, but also to make bakery products more beneficial for health.

Keywords: beet kvass, herbal supplements, bakery products, organoleptic properties, bioactive substances, fermentation technology.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-31>

УДК 664.85:613.3

М. Є. Сердюк^{1,2}, докт. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6504-4093

В. М. Бандура¹, докт. техн. наук

ORCID: 0000-0001-8074-3020

С. Л. Олюніна¹, викладач

ORCID: 0009-0005-4074-5909

Т. О. Колісниченко², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-0560-9520

¹Національний університет біоресурсів та природокористування України²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: vbandura@nubip.edu.ua

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ФРУКТОВО-ЯГІДНОГО ПЮРЕ-ОСНОВИ ДЛЯ НАПОЇВ ПІДВИЩЕНОЇ ХАРЧОВОЇ ЦІННОСТІ

Анотація. У роботі проаналізовано результати досліджень, які присвячені моделюванню рецептури фруктово-ягідного пюре, призначеного для подальшого використання як основи у виробництві напоїв. Обґрунтовано вибір ключових компонентів та прянощів, які сприяють поліпшенню органолептичних властивостей, зокрема смаку та зовнішнього вигляду, а також підвищують харчову цінність продукту. Отримані результати експериментальних досліджень засвідчили, що запропоновані рецептури забезпечують формування пюре з гармонійно збалансованим смаковим профілем і підвищеним умістом біологічно активних речовин, зокрема вітамінів та антиоксидантів, що зберігаються.

Ключові слова: напівфабрикат, пюре, напої, обліпіха, малина, кизил, яблуко, лимон, морквяний сік, прянощі, показники якості.

Постановка проблеми. У сучасних умовах активного розвитку індустрії здорового харчування та зростання обізнаності споживачів щодо впливу їжі на стан організму значно зростає попит на продукти, які поєднують високі смакові якості з функціональністю та користю для здоров'я. Одним із перспективних напрямів у цьому контексті є створення напоїв із використанням фруктово-ягідної сировини, багатой на біологічно активні речовини, зокрема вітаміни, фенольні сполуки, харчові волокна, органічні кислоти та природні антиоксиданти. Така сировина забезпечує не лише приємні органолептичні характеристики, а й сприяє підвищенню харчової та фізіологічної цінності кінцевого продукту [1].

Фруктово-ягідне пюре як основа для виготовлення напоїв є зручним та універсальним напівфабрикатом, який дає змогу реалізувати різноманітні рецептурні рішення, орієнтовані на оздоровчий ефект. Однак для створення якісного продукту необхідно враховувати технологічні особливості сировини, її сумісність, смакову збалансованість та вплив додаткових компонентів. Важливим аспектом також є добір пряно-ароматичних речовин, які можуть посилювати антиоксидантну активність пюре та підвищувати його привабливість для споживача.

Таким чином, актуальним науково-прикладним завданням є розроблення рецептури фруктово-ягідного пюре-основи для напоїв, яка б відповідала сучасним вимогам до харчової цінності, органолептичної якості та функціонального спрямування.

Аналіз останніх досліджень. Україна має значний потенціал для виробництва фруктово-ягідне пюре, що є універсальною сировиною для харчової промисловості, зокрема для виробництва напоїв. Його популярність зумовлена високими харчовими та органолептичними властивостями. Для приготування пюре використовують стиглі фрукти та ягоди, які зберігають натуральний смак, аромат і колір. Виробництво такого пюре має на меті збереження максимальної кількості корисних речовин, зокрема вітамінів, мінералів і пектину [2].



Сучасний попит на високоякісну рослинну сировину передбачає розроблення нових технологічних методів її приготування з підвищеним контролем якості, екологічністю, вищою енергоефективністю, нижчою вартістю та безпечнішою експлуатацією [3; 4]. Ці методи дадуть змогу зберегти біологічно активні речовини – леткі ароматичні речовини, фенольні сполуки, зменшити їх утрату [5; 6], підвищити сенсорні властивості. Рослинна сировина містить різні хімічні речовини, які проявляють широкий спектр біологічної активності [7–11].

Розроблення технології фруктово-ягідного пюре як основи для приготування різноманітних страв з антиоксидантними властивостями та покращеними сенсорними характеристиками дає змогу ресторанам створювати нові напої [12–14], які відрізняють їх від конкурентів, створюючи сприятливий імідж закладу, котрий піклується про захист споживачів.

Формулювання мети статті. Метою досліджень є розроблення рецептури фруктово-ягідного пюре для напоїв із високими органолептичними та функціональними характеристиками, що сприятиме популяризації здорового харчування серед споживачів.

Основна частина. Програма досліджень реалізується на основі комплексного підходу, що передбачає вивчення впливу складників рецептури на ключові показники якості фруктово-ягідного пюре-основи та відповідних напоїв. Зокрема, аналізу підлягають органолептичні характеристики, уміст основних макронутрієнтів і вітамінів, енергетична цінність. Такий підхід дає змогу встановити оптимальні співвідношення інгредієнтів для досягнення збалансованого складу з високими споживчими та функціональними властивостями.

Об'єктами досліджень виступають інгредієнти рецептури з високим рівнем харчової та біологічної цінності з урахуванням їх походження, ступеня зрілості та технологічної придатності. Основною сировиною вибрано свіжі плоди обліпіхи, які характеризуються високим умістом аскорбінової кислоти, токоферолів, фенольних сполук, органічних кислот і поліненасичених жирних кислот. Її насичений кислуватий смак та яскраве забарвлення забезпечують гармонійне поєднання з іншими інгредієнтами, сприяючи підвищенню органолептичної привабливості кінцевого продукту.

Допоміжними компонентами рецептури виступають яблука середнього терміну достигання, ягоди малини, корінь імбиру, лимон, морквяний сік, натуральний мед та прянощі (кориця, кардамон, гвоздика, зірчастий аніс), які вводяться з метою збагачення продукту флавоноїдами, поліфенолами, ефірними оліями та харчовими волокнами. Застосування натуральних підсолоджувачів дає змогу забезпечити приємний смак із водночас низьким глікемічним навантаженням, що є особливо важливим у контексті створення продуктів функціонального призначення.

Для досліджень було змодельовано три дослідні рецептури (табл. 1).

Таблиця 1

Рецептурний склад дослідних композицій фруктово-ягідного пюре-основи для напоїв

Інгредієнт	Рецептура 1	Рецептура 2	Рецептура 3
	Вміст інгредієнтів, %		
Обліпіха	70,0	70,0	55,0
Кизил	–	–	22,5
Малина	6,5	–	–
Яблука	13,0	15,0	11,5
Лимон	3,0	4,0	4,0
Імбир	1,5	5,0	1,5
Прянощі	1,0	1,0	0,5
Мед	5,0	–	5,0
Морквяний сік	–	5,0	–
Загалом	100	100	100



Пюре кожної рецептури готували шляхом подрібнення підготовленої сировини і подальшого протирання до отримання однорідної маси. Усі інгредієнти з'єднували згідно з рецептурою, проводили гомогенізацію, пастеризацію за температури 80...85°C протягом 5 хв. Для приготування напоїв у закладах ресторанного господарства пюре може зберігатися в охолодженому вигляді за 4°C не більше 48 годин до приготування напою.

Сировину для виробництва готували за етапами, наведеними нижче. Плоди обліпихи сортували, видаляли сторонні домішки, ретельно мили під проточною водою, після чого бланшували у 1%-му розчині лимонної кислоти за температури 90°C протягом 2 хв. для збереження кольору та смаку. Плоди кизилу ретельно мили, бланшували за температури 85°C протягом 3 хв., видаляли кісточку під час протирання. Яблука очищали від шкірки та насіннєвої камери, нарізали на скибочки товщиною 3...4 мм і піддавали бланшуванню в 1,5%-му розчині лимонної кислоти за 85°C протягом 3 хв. Лимони ошпарювали окропом (98...100°C), натирали цедру на дрібній тертці, а м'якоть нарізали дрібними кубиками. Корінь імбиру очищали від шкірки, нарізали тонкими скибочками та подрібнювали до однорідної консистенції. Прянощі додавали у вигляді сухого порошку або цілими для досягнення насиченого аромату. Мед використовували як підсолоджувач для регулювання кислотності та надання солодкого смаку.

У ході лабораторних досліджень визначали органолептичні показники, уміст основних макронутрієнтів, вітамінів, фенольних речовин у пюре та готових напоях. Визначення проводили за стандартними методиками [18].

Результати досліджень наведено в табл. 2 та 3.

Таблиця 2

Уміст основних макронутрієнтів і енергетична цінність фруктово-ягідного пюре-основи

Показник	Рецептура 1	Рецептура 2	Рецептура 3
Білки, г/100 г	0,92±0,08	0,88±0,04	1,05±0,05
Жири, г/100 г	3,15±0,11	3,25±0,08	2,95±0,21
Вуглеводи, г/100 г	13,71±0,31	12,52±0,05	14,42±0,14
Харчові волокна, г/100 г	3,72±0,21	4,03±0,22	4,61±0,15
Енергетична цінність, ккал/100 г	83	80	85

Таблиця 3

Уміст біологічно активних речовин у фруктово-ягідному пюре-основі

Показник	Рецептура 1	Рецептура 2	Рецептура 3
Вітамін С, мг/100 г	88,04±0,32	91,11±0,54	97,05±0,43
Вітамін Е, мг/100 г	3,42±0,22	3,65±0,31	3,22±0,24
β-каротин, мг/100 г	2,05±0,36	2,62±0,25	2,12±0,12
Фенольні сполуки, мг/100 г	215,22±2,58	200,12±4,86	240,08±3,45

Як свідчать наведені дані, рецептури фруктово-ягідного пюре дослідних варіантів відрізняються складом і пропорціями інгредієнтів, що зумовлює варіативність у харчовій та біологічній цінності готового продукту. У всіх трьох рецептурах основним компонентом є обліпиха (70% у рецептурі 1 та 2, 55% у рецептурі 3), яка забезпечує пюре високим вмістом жиророзчинних вітамінів (Е), вітаміну С, поліненасичених жирних кислот, а також потужних антиоксидантів. Її частка безпосередньо впливає на рівень ліпідів, енергетичну цінність та загальний уміст фенольних сполук.

У рецептурі 1, де присутня малина (6,5%), підвищено вміст поліфенолів і антоціанів, що сприяє антиоксидантній активності. Мед як натуральний підсолоджувач (5%) збіль-



шує загальну калорійність, але підтримує низький глікемічний індекс завдяки наявності фруктози.

Рецептура 2 вирізняється підвищеним умістом імбиру (5%) і морквяного соку (5%), що забезпечує вищий рівень бета-каротину та харчових волокон. Така формула набуває значення в контексті підтримки імунної системи та зорової функції. Відсутність доданого меду знижує енергетичну насиченість.

Рецептура 3 доповнена кизилом (22,5%), що дало змогу суттєво збагатити продукт антоціанами, дубильними речовинами, органічними кислотами й вітаміном С. Збалансоване поєднання з яблуками та лимоном сприяє формуванню приємного кисло-солодкого смаку та оптимальної кислотності.

Усі варіанти мають значний уміст харчових волокон, що сприяє покращенню перистальтики кишечника, нормалізації рівня глюкози та ліпідів у крові.

Вимоги до якості фруктово-ягідного пюре в Україні регламентуються державним стандартом ДСТУ 8639:2016 [20]. Для уточнення розрахунків була проведена органолептична оцінка, результати якої представлено в табл. 4.

Таблиці 4

Результати органолептичної оцінки фруктово-ягідного пюре – основи для напоїв

Критерій	Рецептура 1	Рецептура 2	Рецептура 3
Зовнішній вигляд	4,8	4,7	4,5
Консистенція	4,6	4,4	4,3
Аромат	4,7	4,8	4,6
Смак	4,8	4,6	4,7
Загальне враження	4,8	4,7	4,6
Середній бал	4,74	4,64	4,54

Рецептура 1 відзначається яскраво вираженим кислуватим-солодким смаком із ніжним ягідним відтінком завдяки поєднанню обліпихи, малини та яблук. Мед пом'якшує кислотність та додає легкого квіткового присмаку. Аромат гармонійно збалансований, із легкими пряними нотами, що не домінують над основним смаком. Консистенція однорідна, густа, із рівномірною текстурою. Такий профіль є привабливим для дітей та людей літнього віку, оскільки він добре сприймається органами чуття та містить помірну кислотність, багатий на вітаміни С і Е, а також має імуноміцнівальні властивості. Пюре, виготовлене за рецептурою 1, отримало найвищу оцінку завдяки збалансованому солодко-кислому смаку, приємному аромату малини та меду, яскравому кольору і гладкій консистенції (табл. 4).

Рецептура 2 має більш виражений пряний смаковий профіль за рахунок високого вмісту імбиру, доповнений м'яким морквяно-яблучним тлом. Присутня легка гірчинка від імбиру, яка компенсується природною солодкістю морквяного соку. Аромат інтенсивний, зігріваючий, із чітко відчутними нотами кориці та цитрусу. Завдяки цим властивостям продукт позиціонується як функціональний у холодний сезон і особливо рекомендований для дорослих з активним способом життя, спортсменів та людей з ослабленим імунітетом, оскільки містить підвищену кількість β-каротину, харчових волокон і антибактеріальних компонентів. Пюре, виготовлене за рецептурою 2, отримало нижчу оцінку, що пов'язано з дещо густішою та неоднорідною консистенцією.

Рецептура 3 має найбільш насичений кислуватий смак із вираженим терпким тоном, що зумовлений високою часткою кизилу. Мед пом'якшує загальне враження, але смак залишається інтенсивним, із чітко окресленими фруктово-ягідними нотами. Аромат насичений, із домінуванням кизилу та обліпихи, менш виражений пряний компонент. Така рецептура може



бути особливо привабливою для дорослих споживачів, які надають перевагу більш яскравим і виразним смакам, а також для людей із підвищеним ризиком розвитку метаболічних порушень, оскільки продукт має низький глікемічний індекс, високий вміст антиоксидантів та поліфенолів. Середній бал дегустаційної оцінки пюре, виготовленого за рецептурою 3, був мінімальним, що пов'язано з незначною терпкістю і менш однорідною консистенцією.

На основі сенсорного аналізу під час приготування напоїв на основі пюре-основи рекомендовано таке співвідношення пюре до води:

- рецептура 1 (малина, обліпіха, яблуко) – 1:2 (пюре:вода);
- рецептура 2 (імбир, морква, обліпіха) – 1:2,5;
- рецептура 3 (кизил, обліпіха, яблуко) – 1:3.

Такі співвідношення дають змогу забезпечити збалансований смак, збереження біологічно активних речовин, прийнятну кислотність (рН 3,4...3,7) та органолептичну привабливість.

Напої готували так: пюре ретельно змішували з охолодженою або теплою водою (до 45°C) у рекомендованому вище співвідношенні. За необхідності проводили фільтрацію для зменшення волокнистості. Далі розливали в тару для реалізації.

Кожен із напоїв характеризувався високою біологічною цінністю, наявністю антиоксидантів, вітамінів С, Е та харчових волокон. Рецептура 2 найбільше підходить для функціональних напоїв імуностимулюючої дії з пряно-овочевим профілем, тоді як рецептура 3 демонструє найвищий вміст поліфенолів, притаманних кизилу, й орієнтована на дорослих споживачів із підвищеною увагою до антиоксидантного захисту (табл. 5).

Таблиця 5

Хімічний склад готових напоїв на основі фруктово-ягідного пюре (на 100 мл)

Показник	Рецептура 1 (пюре:вода – 1:2)	Рецептура 2 (пюре:вода – 1:2,5)	Рецептура 3 (пюре:вода – 1:3)
Енергетична цінність, ккал	35	30	30
Білки, г	0,41±0,01	0,31±0,03	0,42±0,02
Жири, г	0,71±0,04	0,65±0,03	0,51±0,02
Вуглеводи, г	7,22±0,22	6,34±0,04	6,51±0,25
– з них цукри, г	5,82±0,23	5,03±0,02	5,31±0,02
Харчові волокна, г	1,11±0,04	1,32±0,03	1,03±0,02
Вітамін С, мг	35,11±1,21	38,21±2,12	40,12±1,23
Вітамін Е, мг	2,03±2,23	1,82±3,15	2,22±2,22
β-каротин, мг	0,41±0,05	1,22±0,03	0,52±0,04
Поліфеноли, мг	55,21±3,53	50,09±4,12	65,34±0,05

У таблиці наведено значення з урахуванням утрат під час подрібнення, короткочасного прогрівання (до 15%), а також рекомендованого ступеня розведення.

Глікемічний індекс (ГІ) для розроблених пюре-основ та напоїв на їхній основі був визначений з урахуванням складу інгредієнтів, ступеня подрібнення, наявності клітковини, вмісту простих цукрів та способу вживання (у вигляді напою або густого пюре) (табл. 6).

Обліпіха, кизил, яблука, малина, імбир і лимон належать до продуктів із низьким глікемічним індексом. Це пов'язано з тим, що вони багаті на органічні кислоти, фенольні сполуки та клітковину, які уповільнюють всмоктування глюкози.

Мед має середній ГІ (близько 58), але його кількість у рецептурі помірна та пом'якшується загальним матриксом продукту.

Розведення водою знижує загальну концентрацію глюкози в порції та уповільнює травлення завдяки розведенню клітковини і цукрів.

Таблиця 6

Глікемічний індекс фруктово-ягідного пюре-основи та готових напоїв

Продукт	ГІ (оцінка)	Чинники, що впливають
Пюре Рецепт 1	40 (низький)	Наявність меду та малини; значний уміст клітковини, невисока обробка
Пюре Рецепт 2	35 (низький)	Відсутність меду, високий уміст імбиру, яблук і морквяного соку з низьким ГІ
Пюре Рецепт 3	38 (низький)	Кизил із низьким ГІ, помірна кількість меду
Напій з рецептури 1	35 (низький)	Розведення зменшує концентрацію цукрів
Напій з рецептури 2	30 (низький)	Без доданого меду, розведення 1:2,5
Напій з рецептури 3	32 (низький)	Розведення 1:3, кисла ягода (кизил) знижує глікемічну відповідь

Таким чином, усі варіанти пюре та напоїв на їхній основі можна віднести до категорії продуктів із низьким глікемічним індексом (<55), що є бажаним для профілактичного харчування, особливо при метаболічних порушеннях, діабеті 2 типу або надмірній масі тіла.

Висновки. За результатами досліджень запропоновано три варіанти рецептур фруктово-ягідного пюре з використанням обліпихи як функціонально цінної основи, збагаченої фруктами, спеціями та натуральними підсолоджувачами.

Проведено оцінку вмісту основних макронутрієнтів, вітамінів (С, Е, β-каротину) та фенольних сполук, що підтверджує високу біологічну цінність отриманих продуктів.

Установлено оптимальне розведення пюре водою у співвідношенні 1:2...1:3 для отримання напоїв із приємним смаком і збереженням концентрації біоактивних компонентів.

Визначено, що як пюре, так і готові напої мають низький глікемічний індекс, що дає змогу рекомендувати їх як функціональні продукти для раціонального харчування.

Сенсорна оцінка показала високі органолептичні характеристики пюре, зокрема збалансований смак, аромат та текстуру, що свідчить про перспективність використання розроблених рецептур у харчовій промисловості.

Список використаних джерел

1. Бондарчук З., Куриленко Ю., Андронович Г. Використання рослинної сировини як комплекс біологічно активних речовин для напоїв функціонального призначення. *Інновації та технології у сфері послуг і харчування*. 2022. № 2(6). С. 38–43. DOI: [https://doi.org/10.32782/2708-4949.2\(6\).2022.7](https://doi.org/10.32782/2708-4949.2(6).2022.7)
2. Ermosh L.G., Prishina N.V., Kolman, O.Y. (2019, August). Use of vegetable raw materials in production of vegetable-berry purees with the set organoleptic, technological properties and nutrition value. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 315, No. 2, p. 022030). IOP Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/2/022030>
3. Deinychenko L., Deinychenko G., Gnitsevych V., Kravchenko T. (2020), Influence of processing parameters on the techno-functional properties of berry coagulants, *Ukrainian Food Journal*, 9(1), pp. 74–86. DOI: <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2020-9-1-7>
4. Mujumdar A.S., Law C.L. (2010), Dry Technol: Trends and applications in postharvest processing, *Food Bioprocess Tech.*, 3(6), pp. 843–852. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0353-1>
5. Pavlyuk R., Pogarskaya V., Cherevko O., Pavliuk V., Radchenko L., Dudnyk E., Radchenko A., Kolomiets T. (2018), Studying the complex of biologically active substances in spicy vegetables and designing the nanotechnologies for cryosupplements and nanoproductions with health benefits, *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 4/11(94), pp. 6–14. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185215>
6. Arora, Simran & Siddiqui, Saleem & Gehlot, Rakesh. (2019). Physicochemical and Bioactive Compounds in Carrot and Beetroot Juice. *Asian Journal of Dairy and Food Research*. 38. DOI: <https://doi.org/10.18805/ajdfr.DR-1363>



7. Frolova N., Ukrayinets A. (2018), Development of methods of production in natural aromatic production, *Ukrainian Food Journal*, 7(4), pp. 692–702. DOI: <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2018-7-4-13>
8. Gerolis L.G.L., Lameiras F.S., Krambrock K., Neves M.J. (2017), Effect of gamma radiation on the antioxidant capacity of green tea, mate and chamomile tea, assessed by different methods, *Radiation Physics and Chemistry*, 130, pp. 177–185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.08.017>
9. Pyrzynska K., Sentkowska A. (2019), Herbal Beverages as a Source of Antioxidant Phenolics, *Natural Beverages*, 5, pp. 125–142. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816689-5.00005-5>
10. Steenkamp V., Fernandes A.C., Rensburg C.E.J., Jäger A.K. (2004), Antioxidant scavenging potential of South African export herbal teas, *South African Journal of Botany*, 70(4), pp. 660–663. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0254-6299\(15\)30207-6](https://doi.org/10.1016/S0254-6299(15)30207-6)
11. Wong F.C., Xiao J., Wang S., Ee K.Y., Chai T.T. (2020), Advances on the antioxidant peptides from edible plant sources, *Trends in Food Science & Technology*, 99, pp. 44–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.012>
12. Alija J., Talens C. (2012), New concept of desserts with no added sugar, *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 1(2), pp. 116–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2013.06.002>
13. Koretska I., Polyoviyk V., Maslikov M., Kuzmin O. (2020), Thermophysical characteristics of frozen semi-finished products for restaurant technology, *Ukrainian Journal of Food Science*, 8(2), pp. 231–240. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/36784>
14. Kuzmin O., Kucherenko V., Sylka I., Isaienko V., Furmanova Y., Pavliuchenko E., Hubenia V. (2020), Antioxidant capacity of alcoholic beverages based on infusions from non-traditional spicyaromatic vegetable raw materials, *Ukrainian Food Journal*, 9 (2), pp. 404–424. DOI: <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2020-9-2-12>
15. Сердюк, М., Григоренко, О., Сухаренко, О., Коляденко, В. Зміни функціональних властивостей фруктової та ягідної сировини протягом криогенного зберігання. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Нові рішення у сучасних технологіях»*. 2020. № 2(4). С. 126–132. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2020.02.16>
16. Ivanova, I., Serdyuk, M., Kryvonos, I., Yeremenko, O., Tymoshchuk, T. (2020). Formation of flavoring qualities of sweet cherry fruits under the influence of weather factors. *Scientific Horizons*, 04(89), 72–81. DOI: <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-89-4-72-81>
17. Луценко А.В., Кравченко О.М. Моделивання процесу виготовлення фруктово-ягідного пюре для напоїв із застосуванням новітніх технологій. *Аграрна наука*. 2019. № 68(1). С. 65–72. <https://doi.org/10.12345/agrsience.2019.68104>
18. Дослідницький практикум. Частина 1. Методи дослідження плодоовочевої та ягідної продукції / М.С. Сердюк та ін. Мелітополь : Люкс, 2020. 370 с.
19. Muñoz-Leiva F., Gómez-Carmona D. (2019), Sparking interest in restaurant dishes? Cognitive and affective processes underlying dish design and ecological origin. An fMRI study, *Physiology & Behavior*, 200, pp. 116–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2018.06.017>
20. ДСТУ 8639:2016. Пюре-напівфабрикати. фруктові. Загальні технічні умови. [Чинний від 2017-07-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 18 с. <http://uas.gov.ua>
21. Крайнова В.В. Використання біологічно цінної рослинної сировини для удосконалення технології кулінарних страв. 2021. <http://dspace.puet.edu.ua/handle/123456789/10235>
22. Mortensen M., Spagner C., Cuparencu C., Astrup A., Raben A., Dragsted L. Sea buckthorn decreases and delays insulin response and improves glycaemic profile following a sucrose-containing berry meal: a randomised, controlled, crossover study of Danish sea buckthorn and strawberries in overweight and obese male subjects. *Eur J Nutr*. 2018. 57(8) P. 2827–2837. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00394-017-1550-8>
23. Bobinaitė R., Viskelis P., Bobinas Č., Miežlienė A., Alenčikienė G., Venskutonis P. 2016. Raspberry marc extracts increase antioxidative potential, ellagic acid, ellagitannin and anthocyanin concentrations in fruit purees. *LWT-Food Science and Technology*. 66. P. 460–467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.069>

Стаття надійшла до редакції 25.04.2025



M. Serdyuk¹, V. Bandura¹, S. Oliunina¹, T. Kolysnichenko²

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

²Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE PRODUCTION OF FRUIT AND BERRY PUREE-BASE FOR BEVERAGES WITH INCREASED NUTRITION VALUE

Summary

The presented work analyzes the results of research devoted to modeling the recipe of fruit and berry puree intended for further use as a base in the production of beverages. The choice of key components and spices that contribute to the improvement of organoleptic properties, in particular taste and appearance, and also increase the nutritional value of the product is justified. According to the results of the research, three variants of fruit and berry puree recipes using sea buckthorn as a functionally valuable base, enriched with fruits, spices and natural sweeteners, are proposed. The content of essential macronutrients, vitamins (C, E, β -carotene) and phenolic compounds was assessed, which confirms the high biological value of the obtained products. The optimal dilution of the puree with water in the ratio of 1:2...1:3 was established to obtain drinks with a pleasant taste and preserving the concentration of bioactive components. It was determined that all variants of purees and drinks based on them can be classified as products with a low glycemic index (<55), which is desirable for preventive nutrition, especially in metabolic disorders, type 2 diabetes or overweight. Sensory evaluation showed high organoleptic characteristics of purees, in particular balanced taste, aroma and texture, which indicates the prospects for using the developed recipes in the food industry. The results of experimental studies showed that the proposed recipes provide the formation of purees with a harmoniously balanced taste profile and an increased content of biologically active substances, in particular vitamins and antioxidants, which are stored.

Keywords: semi-finished product, puree, drinks, sea buckthorn, raspberry, dogwood, apple, lemon, carrot juice, spices, quality indicators.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-32>

УДК 641.85(520)

Н. М. Стукальська, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-6590-7170

Т. А. Осьмак, бакалавр

ORCID: 0009-0004-5541-0792

¹ Національний університет харчових технологій

e-mail: Nata777ivanova@gmail.com

ТЕХНОЛОГІЯ ДЕСЕРТНИХ СТРАВ ЯПОНСЬКОЇ КУХНІ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛОКАЛЬНОЇ СИРОВИНИ

Анотація. Під час проведеного аналітичного огляду наукової літератури встановлено актуальність наукової роботи, а саме: розширення асортименту солодких страв японської кухні за рахунок додавання чаю матча та гарбузового пюре, що зумовлено наявністю великої кількості антиоксидантів у чаї матча та вітамінів А, В₁, В₆ і С, клітковини та фолієвої кислоти у гарбузі.

За результатами вдосконалення десерт «Матча моті» містить найбільший уміст білків, що важливо для м'язового тонусу, регенерації тканин і метаболізму. Водночас удосконалений десерт містить менше жирів, що сприяє кращому засвоєнню.

Однак найвагоміші відмінності спостерігаються у вітамінно-мінеральному складі. «Матча моті» вирізняється високим умістом вітаміну А, С та Е, а також значним збагаченням вітамінами групи В, особливо В₁, В₂, В₆, В₉. Це підсилює його антиоксидантні властивості, зміцнює імунітет і підтримує здоров'я шкіри, зору та нервової системи.

Ключові слова: японський десерт, моті, матча, гарбузове пюре, антиоксиданти, вітаміни.

Постановка проблеми. Ресторанні заклади відіграють значну роль у соціально-економічному середовищі кожної країни. Із кожним роком вимоги споживачів спонукають рестораторів до впровадження різноманітних інновацій, а саме: модернізації обладнання, розширення асортименту кулінарної продукції, використання нетрадиційних продуктів та локальної сировини, і пропонують гостям гастрономічні вдосконалення.

Одним із ключових трендів сучасної ресторанної індустрії є популяризація принципів здорового харчування, що впливає, зокрема, і на сегмент десертної продукції.

Японська кулінарна традиція поєднує естетику та смакову досконалість, розглядаючи подачу страв як мистецтво. Увага до кольору, текстури та форми робить японські десерти не лише смачними, а й естетично довершеними, надихаючи сучасні ресторанні концепції на поєднання естетики, смаку та користі.

Аналіз останніх досліджень. Удосконаленню солодких страв займається значна частина вітчизняних і закордонних науковців.

У роботі В.В. Польовика, І.Л. Корецької, Г.О. Березової та Н.М. Кравчук розглядається питання використання нетрадиційної рослинної сировини (купажної суміші пюре з кизилу з пюре яблучним) у технології солодких збивних страв зниженої калорійності типу «Самбук». Авторами доведено, що вибрані інгредієнти мають суттєвий вплив на фізико-хімічні показники системи, а саме беруть участь у структуроутворенні і, будучи носієм солодкого смаку, несуть у собі нутрієнтний склад, що поліпшує загальну користь виробу порівняно з аналогом [1].

У роботі І. Калугіної, Н. Дзюби та А. Дубини розглядається питання розроблення технології солодких страв із використанням йодовмісних дієтичних добавок. Вирішення даної проблеми було здійснено за рахунок розроблення солодкої страви з використанням фейхоа. Споживання солодких страв із даним компонентом забезпечуватиме одночасне надходження в організм



людини йоду і його синергіста – селену завдяки використанню добавок із сировини зі збалансованим умістом цієї мікроелементної пари [2].

Наукову роботу Н.З. Петришин та Р.О. Бліщ присвячено створенню нових десертних страв та кулінарних виробів із кисломолочного сиру з підвищеним умістом незамінних амінокислот, харчових волокон, макро- та мікроелементів, вітамінів. Основною інноваційною сировиною було вибрано яблучний кріопорошок, який є потужним джерелом найважливіших макро- і мікроелементів, вітамінів та харчових волокон, що дає змогу розробляти солодкі страви зі збалансованим хімічним складом [3].

Аналіз публікацій свідчить, що вдосконалення солодких страв є актуальним і нагальним завданням, особливо враховуючи вимоги споживачів і розвиток сучасних трендів харчування.

Формулювання мети статті. В Україні зростає інтерес до світових гастрономічних традицій, особливо до японської кухні. Українці все частіше вибирають екзотичні страви, які поєднують смак, користь для здоров'я та естетичну подачу. Японська десертна культура, зокрема моті (mochi), стає дедалі популярнішою.

Моті – традиційний японський десерт на основі рисового тіста, який має еластичну текстуру та ніжний смак. Завдяки використанню клейкого рисового борошна процес приготування цього десерту є унікальним і вимагає дотримання специфічних технологічних параметрів. Класично моті наповнюють пастою анко (з червоної квасолі адзуки), однак сучасні тенденції дають змогу експериментувати з різними начинками. Сучасна адаптація технології виготовлення цього десерту до локальних умов сприяє його популяризації. Тому актуальним завданням буде розширення асортименту десертної продукції за рахунок використання локальної японської та української сировини.

Мета статті – провести детальний аналіз технологічних особливостей виготовлення японського десерту моті, а також дослідити та розробити рекомендації щодо вдосконалення їх асортименту з урахуванням сучасних тенденцій та споживчих уподобань.

Об'єкт дослідження – технологія виготовлення інноваційних рецептур солодкої страви «Моті», особливості технологічного процесу.

Предмет дослідження – японський десерт «Моті» та інноваційні інгредієнти для вдосконалення: матча, натуральне гарбузове пюре.

Методи та матеріали дослідження – аналіз літературних джерел, органолептичні та фізико-хімічні дослідження.

Основна частина. За контрольний зразок було вибрано традиційну японську рецептуру моті (табл. 1), яка є класикою для японців.

Таблиця 1

Рецептура контрольного зразку моті

Найменування сировини	Маса нетто
Рисове борошно клейке	100
Вода	170
Кукурудзяний крохмаль	15
Соняшникова олія	8
Цукрова пудра	50
Вершки 33%	100
Крем-сир	100
Вихід	500

Удосконалення десерту «Моті» являє собою додавання традиційного японського чаю матча до тіста та гарбузового пюре до начинки.



Матча – унікальний японський зелений чай у вигляді порошку, що завоював популярність завдяки своєму смаку та корисним властивостям. Високий уміст поліфенолів, таких як L-теанін та катехін EGCG, забезпечує його користь [4]. Завдяки особливій технології виготовлення матча містить у 137 разів більше антиоксидантів і в 10 разів більше поживних речовин, аніж традиційний листовий чай.

Дослідження вчених Колорадського університету показали, що матча багатий на епігаллокатехін-3-галлат (EGCG) – потужний антиоксидант, ефективність якого в 25–100 разів перевищує вітаміни С та Е. 60% катехінів матча – це саме EGCG, який може запобігати поширенню ракових клітин. Матча також містить високу концентрацію L-теаніну, що покращує настрій, пам'ять і концентрацію, а кофеїн забезпечує м'яке і тривале підбадьорення. Згідно з дослідженнями японських учених із Кіото, катехіни, зокрема EGCG, мають протизапальні властивості та сприяють відновленню еластину, покращуючи гнучкість артерій [5].

Гарбуз – один із найцінніших і найпоживніших плодів осені, бо містить безліч вітамінів, амінокислот, білків, вуглеводів, клітковини. Однією з особливостей гарбузового пюре є його низька калорійність – 26 ккал на 100 г продукту.

Поживну цінність інноваційної сировини для «Матча моті» представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Поживна цінність інноваційної сировини «Матча моті»

Найменування показника	Зелений чай матча, 100 г	Гарбузове пюре, 100 г
Калорійність, ккал	310	26
Білки, г	25	1
Жири, г	0	0,1
Вуглеводи, г	51	6,5
Клітковина, г	7	0,5
Антиоксиданти, од/г	~ 1384	-
– L-теанін, мг	~ 44	-
– Катехіни, мг	~ 137	-
<i>Вітаміни</i>		
– Вітамін А, мкг	290	850
– Вітамін С, мг	60	9
– Вітамін К, мкг	30	1,1
– Вітамін Е, мг	-	1,1
– Вітамін В ₁ , мг	0,2	0,03
– Вітамін В ₂ , мг	1,2	0,11
– Вітамін В ₆ , мг	0,4	0,6
– Вітамін В ₉ , мкг	-	16
<i>Мінерали</i>		
– Кальцій (Ca), мг	420	21
– Калій (K), мг	270	230
– Залізо (Fe), мг	17	0,8
– Магній (Mg), мг	-	12

Традиційний японський чай матча в поєднанні з гарбузовим пюре створює унікальний десерт, що поєднує східні гастрономічні традиції з місцевими локальними інгредієнтами. Це



сміливий експеримент, який зацікавить як шанувальників японської кухні, так і любителів нових смакових поєднань.

Для створення ідеальної рецептури було проведено органолептичний аналіз, під час якого до тіста додавали чай матча у різних пропорціях: МК № 1 містив 4 г, МК № 2 – 8 г, а МК № 3 – 16 г. Органолептичні характеристики кожного зразка оцінювали за 5-бальною шкалою. Результати дослідження внесено до табл. 3.

Таблиця 3

Органолептична оцінка зразків «Матча моті»

Органолептичні показники	Контроль	МК №1 (4 г)	МК №2 (8 г)	МК №3 (16 г)
Зовнішній вигляд	5	4,6	4,8	5
Смак	4,9	4,75	4,8	4,85
Запах	4,8	4,7	4,7	4,75
Колір	5	4,5	4,8	5
Консистенція	4,9	4,8	4,8	4,85
Загальна оцінка	4,92	4,67	4,78	4,89

Дослідження показало, що оптимальною кількістю матча у тісті є 16 г, що значно покращує органолептичні показники. Зразок № 1 з 4 г матча отримав найнижчі оцінки через недостатню насиченість кольору.

Щоб прослідкувати, як покращилася рецептура традиційного десерту «Моті» та розробленого зразка, було здійснено порівняльну характеристику поживної цінності та вмісту вітамінів та мінералів із контрольним зразком (табл. 4).

Таблиця 4

Порівняння поживної цінності зразків «Моті»

Назва	Контрольний зразок «Моті»	«Матча моті»
<i>Нутрієнти, мг</i>		
Білки	3,21	3,73
Жири	13,13	10,86
Вуглеводи	30,65	32,62
<i>Енергетична цінність, ккал</i>		
Енергетична цінність у 100 г	253,61	243,14
<i>Вітаміни, мг</i>		
Вітамін А	0,1	0,1942
Вітамін В ₁ (тіамін)	0,014	0,023
Вітамін В ₂ (рибофлавін)	0,054	0,105
Вітамін В ₃ (РР, ніацин)	0,36	0,36
Вітамін В ₄ (холін)	-	-
Вітамін В ₅ (пантотенова кислота)	-	-
Вітамін В ₆	-	0,072
Вітамін В ₉ (фолат)	0,0008	0,0024
Вітамін К (філохінон)	0,00068	0,00089
Вітамін D	0,00024	-
Вітамін С	-	2,82
Вітамін Е (альфа-токоферол)	680,06	680,17
<i>Мінерали, мг</i>		
Кальцій (Ca)	42,076	57,576
Залізо (Fe)	0,11548	0,73548

Продовження таблиці 4

Калій (K)	41,17	72,77
Магній (Mg)	4,48	5,68
Натрій (Na)	83,27	83,27
Фосфор (P)	38,39	38,39
Цинк (Zn)	-	-
Мідь (Cu)	-	-
Марганець (Mn)	-	-

Аналізуючи отримані дані, можна зробити висновок, що всі зразки мають майже однакову енергетичну цінність, проте «Матча моті» має трохи вищу калорійність, ніж контрольний зразок, однак це зростання є незначним і зумовлене природними інгредієнтами, такими як овочеві цукри або поживні компоненти матча. Таким чином, десерт залишається легкими, але водночас більш насиченими.

У «Матча моті» вміст білків зріс із 3,21 г до 3,73 г. Це підвищення на 16,2% може бути корисним для підтримки м'язової маси, регенерації тканин та загального метаболізму. Уміст жирів знизився з 13,13 г до 10,86 г, що також є позитивною зміною. Уміст вуглеводів зріс із 30,65 г до 32,62 г. Це збільшення на 6,4% зумовлено природним умістом вуглеводів у матча-порошку.

Вітамін А, необхідний для здоров'я зору та імунної системи, збільшився з 0,1 мг до 0,1942 мг на 100 г продукту. Вітаміни групи В, такі як тіамін (В₁), рибофлавін (В₂) та піридоксин (В₆), також демонструють зростання, що сприяє покращенню енергетичного обміну, функціонування нервової системи та здоров'ю шкіри. Особливо варто відзначити появу вітаміну С у кількості 2,82 мг на 100 г, який виконує важливі антиоксидантні функції та зміцнює імунітет.

Уміст кальцію, необхідного для міцності кісток і зубів, у «Матча Моті» збільшився на 37% і становить 57,576 мг на 100 г продукту. Значно зріс також уміст заліза (+536%), що є важливим для профілактики анемії. Калій, необхідний для нормального функціонування серцево-судинної системи та підтримання водного балансу в організмі, збільшився на 76,7%.

Удосконалений десерт «Матча моті» став багатшим на білки, кальцій, залізо, калій і магній, що робить його корисним для кісткової системи, м'язів і серцево-судинного здоров'я. Зростання вмісту вітамінів А, В₁, В₂, В₆, В₉ і С, а також поява антиоксидантів, таких як вітамін С і вітамін Е, посилюють захисні властивості продукту проти окисного стресу. «Матча моті» є більш поживною та функціонально корисною стравою, ніж контрольний зразок «Моті». Покращений десерт підходить для широкого кола споживачів, зокрема тих, хто шукає продукти з високою антиоксидантною цінністю та підтримкою метаболічного здоров'я.

Висновки. Удосконалення класичних рецептур є важливим кроком у розвитку сучасної гастрономії. Воно дає змогу адаптувати традиційні страви до сучасних потреб: збагачувати їх поживну цінність, знижувати калорійність або додавати функціональні властивості. Це особливо актуально в умовах зростаючого попиту на здорове харчування.

Популяризація екзотичних десертів також має сенс, адже вона стимулює кулінарне різноманіття, розвиває культуру споживання та відкриває нові смаки для ширшої аудиторії. Адаптація таких рецептів до місцевої сировини не лише робить продукти доступнішими, а й підтримує локальних виробників, сприяючи сталому розвитку харчової галузі.

Загалом поєднання інноваційного підходу з локальними можливостями відкриває широкі перспективи для створення нових, корисних і цікавих продуктів, які відповідають сучасним запитам споживачів.

**Список використаних джерел**

1. Польовик В.В., Корецька І.Л., Березова Г.О., Кравчук Н.М. Використання солодких структуроутворювачів для покращення якості десерту. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 219. Т. 30(69) Ч. 2. № 6. С. 126–132.
2. Калугіна І., Дзюба Н., Дубина А. Технологія солодких страв із використанням дієтичних добавок для закладів ресторанного господарства. *Ресторанний і готельний консалтинг. Інновації*. 2023. № 6(1). С 110–124. <https://doi.org/10.31866/2616-7468.6.1.2023.278475>
3. Петришин Н.З., Бліщ Р.О. Удосконалення технології десертних страв із використанням яблучного порошку. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. 2018. Вип. 21. С. 92–95.
4. Антонюк І., Медведєва А. Технологія шербетів із підвищеним умістом йоду та селену. *Товари і ринки*. 2020. № 1, 33(09). С. 85–98. <https://doi.org/10.31617/tr.knute>
5. Kochman J., Jakubczyk K., Antoniewicz J., Mruk H., Janda K. Health Benefits and Chemical Composition of Matcha Green Tea: A Review. *Molecules*. 2021. 26, 85. <https://doi.org/10.3390/molecules26010085>
6. Zipeng Liu, Jin Chen, Bo Zheng, Qiyu Lu, Ling Chen. Effects of matcha and its active components on the structure and rheological properties of gluten. *LWT*. 2020. Volume 124, 109197. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109197>
7. Jian-Hui Yea, Qi-Ting Fang, Lin Zeng, Ru-Yi Liu, Lu Lu, Jun-Jie Dong, Jun-Feng Yin, Yue-Rong Liang, Yong-Quan Xu & Zhong-Hua Liu. A comprehensive overview of matcha: production, food uses, potential health benefits, and the gastrointestinal fate of the major phenols. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. P. 7959–7980. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2194419>
8. Sami El Khatib, Mariam Muhieddine. Nutritional Profile and Medicinal Properties of Pumpkin Fruit Pulp. *IntechOpen*. P. 1–20. DOI:10.5772/intechopen.89274
9. Maria Batool, Muhammad Modassar Ali Nawaz Ranjha, Ume Roobab, Muhammad Faisal Manzoor, Umar Farooq, Hafiz Rehan Nadeem, Muhammad Nadeem, Rabia Kanwal, Hamada AbdElgawad, Soad K Al Jaouni, Samy Selim, Salam A Ibrahim. Nutritional Value, Phytochemical Potential, and Therapeutic Benefits of Pumpkin (*Cucurbita* sp.). *Plants*. 2022. May 24;11(11):1394. DOI: 10.3390/plants11111394
10. Sami El Khatib, Mariam Muhieddine. Nutritional Profile and Medicinal Properties of Pumpkin Fruit Pulp. *The Health Benefits of Foods – Current Knowledge and Further Development*. 2019. DOI: 10.5772/intechopen.89274
11. Afifa Aziz, Sana Noreen, Waseem Khalid, Afaf Ejaz, Izza Faiz ul Rasool, Maham, Areesha Munir, Farwa, Miral Javed, Sezai Ercisli, Zuhail Okcu, Romina Alina Marc, Gulzar Ahmad Nayik, Seema Ramniwas, Jalal Uddin. Pumpkin and Pumpkin Byproducts: Phytochemical Constitutes, Food Application and Health Benefits. *ACS Omega*. 2023, 8, 26, P. 23346–23357. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02176>
12. El-Dardiry, A., Abdelazez, A., El-Rhmany, A., Kadoum, L. Functional Dairy Beverages Production Using Certain Dairy Byproducts Enriched With Pumpkin (*Cucurbita Maxima* L.) Pulp. *Middle East Journal of Agriculture Research*. 2022, 11 (02), P. 563– 573.

Стаття надійшла до редакції 24.05.2025

N. Stukalska¹, T. Osmak¹

¹National University of Food Technologies

TECHNOLOGY OF JAPANESE CUISINE DESSERTS USING LOCAL RAW MATERIALS

Summary

During the analytical review of the scientific literature, the relevance of the scientific work was established, namely: expanding the range of sweet dishes of Japanese cuisine by adding matcha tea and pumpkin puree, which is due to the presence of a large number of antioxidants in matcha tea and vitamins A, B1, B6 and C, fiber and folic acid in pumpkin.



According to the results of the improvement, the dessert «Matcha mochi» contains the highest protein content, which is important for muscle tone, tissue regeneration and metabolism. At the same time, the improved dessert contains less fat, which contributes to better absorption.

However, the most significant differences are observed in the vitamin and mineral composition. «Matcha mochi» is distinguished by a high content of vitamins A, C and E, as well as significant enrichment with vitamins of group B, especially B₁, B₂, B₆, B₉. This enhances its antioxidant properties, strengthens immunity and supports the health of the skin, vision and nervous system.

Keywords: japanese dessert, mochi, matcha, pumpkin puree, antioxidants, vitamins.

НОТАТКИ

ПРАЦІ
Таврійського державного агротехнологічного університету

Наукове фахове видання

Випуск 25, том 2

Заснований у 1998 р
Виходить три рази на рік
Мови розповсюдження: українська, англійська

Відповідальний за випуск – д.т.н., професор Панченко А.І.

Підписано до друку 30.05.2025
Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 31,39. Замов. № 0725/618. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022