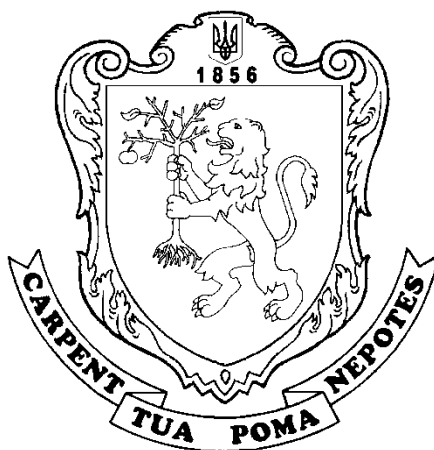


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ВІСНИК

**ЛЬВІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
АГРАРНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

**Агроінженерні дослідження
№ 23**



Львів 2019

Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження. 2019. № 23. 148 с.

Викладено результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також огляди в галузі агроінженерії щодо: вивчення властивостей сільськогосподарських матеріалів і ґрунтів; наукових засад створення нової техніки та технологій; механізації та автоматизації процесів і операцій агропромислового виробництва; надійності та ефективного технічного сервісу машин; енергетики (передовсім відновлюваної); застосування інформаційних систем, а також управління проектами та програмами в агроінженерії; інженерних аспектів екологічної безпеки та безпеки праці в агропромислового виробництві.

Для наукових працівників, фахівців агропромислового виробництва, аспірантів і магістрів, а також студентів інженерних спеціальностей.

*Рекомендовано до друку вченою радою
Львівського національного аграрного університету
(протокол № 4 від 12.11.2019 р.)*

Головний редактор

Роман КУЗЬМІНСЬКИЙ, д. т. н., доцент, Львівський національний аграрний університет, Україна

Редакційна колегія:

Михайло БАБИЧ, к. т. н., доцент, Львівський національний аграрний університет, Україна (відповідальний секретар);

Віталій БОЯРЧУК, к. т. н., професор, Львівський національний аграрний університет, Україна;

Олег КАЛАХАН, д. т. н., професор, Львівський національний аграрний університет, Україна;

Іван КЕРНИЦЬКИЙ, д. т. н., професор, Львівський національний аграрний університет, Україна;

Степан КОВАЛИШИН, к. т. н., професор, Львівський національний аграрний університет, Україна;

Сергій КОРОБКА, к. т. н., доцент, Львівський національний аграрний університет, Україна;

Степан МЯГКОТА, д. ф.-м. н., професор, Львівський національний аграрний університет, Україна;

Вадим ПТАШНИК, к. т. н., доцент, Львівський національний аграрний університет, Україна;

Анатолій ТРИГУБА, д. т. н., в. о. професора, Львівський національний аграрний університет, Україна;

Сергій ХАРЧЕНКО, д. т. н., професор, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Україна;

Андрій ЧАБАН, д. т. н., професор, Львівський національний аграрний університет, Україна;

Алі Аль-ЗУБЕДІ, доктор наук, Університет Вавилона, Ірак;

Павол ФІНДУРА, доктор наук, професор, Словацький сільськогосподарський університет в Нітрі, Словаччина;

Мукрімін ГЮНЕЙ, доктор наук, професор, Гіресунський університет, Туреччина;

Юозас ПАДГУРСКАС, доктор наук, професор, Університет Вітовта Великого, Литва;

Тадеуш ЮЛІШЕВСЬКИЙ, доктор наук, професор, Краківський аграрний університет імені Гуго Коллонтая, Польща;

Павел КСЛБАСА, доктор наук, Краківський аграрний університет імені Гуго Коллонтая, Польща;

Павел МАХАЛ, доктор наук, професор, Університет Менделя в Брно, Чехія;

Тіль МАЙНЕЛ, доктор наук, професор, Кельнський університет прикладних наук, Німеччина;

Юрій МЕЛЬНИК, д. т. н., професор, Державний аграрний університет Молдови, Молдова;

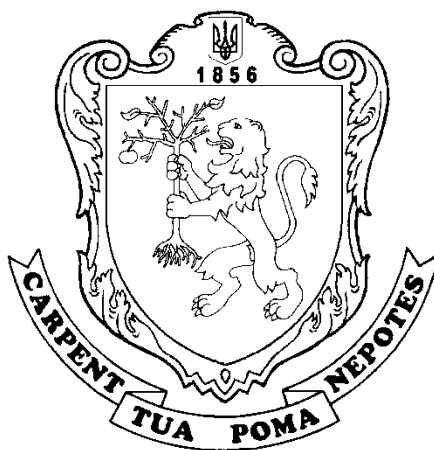
Мітко НІКОЛОВ, доктор наук, Русенський університет імені Ангела Канчева, Болгарія;

Ян ТЮРАН, доктор наук, професор, Університет Нови-Сад, Сербія.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
LVIV NATIONAL AGRARIAN UNIVERSITY

JOURNAL
OF LVIV NATIONAL
AGRARIAN UNIVERSITY

Agroengineering research
№ 23



Lviv 2019

Journal of Lviv National Agrarian University: agroengineering research. 2019. № 23. 148 p.

The results of theoretical and experimental researches as well as reviews in the field of agroengineering concerning: the study of the properties of agricultural materials and soils; of scientific principles of creation of new machines and technologies; of mechanization and automation of processes and operations of agro-industrial production; of reliability and efficient technical service of machines; of energy (particularly renewable); of applying information systems in agroengineering, as well as project and program management; of engineering aspects of environmental safety and labor safety in agroindustrial production are presented.

Intended for researchers, specialists in agro-industrial production, graduate students and masters, as well as students of engineering specialties.

*Recommended for publication by the Academic Council
of Lviv National Agrarian University
(minutes No. 4 dated 12.11.2019)*

Editor-in-Chief

Roman KUZMINSKYJ, Lviv National Agrarian University, Ukraine.

Editorial Board

Mykhailo BABYCH, Lviv National Agrarian University, Ukraine (Executive Secretary);
Vitalyi BOYARCHUK, Lviv National Agrarian University, Ukraine;
Oleh KALAKHAN, Lviv National Agrarian University, Ukraine;
Ivan KERNYTSKYI, Lviv National Agrarian University, Ukraine;
Stephan KOVALYSHYN, Lviv National Agrarian University, Ukraine;
Sergiy KOROBKA, Lviv National Agrarian University, Ukraine;
Stephan MYAGKOTA, Lviv National Agrarian University, Ukraine;
Vadym PTASHNYK, Lviv National Agrarian University, Ukraine;
Anatoliy TRYHUBA, Lviv National Agrarian University, Ukraine;
Sergiy KHARCHENKO, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Ukraine;
Andriy CHABAN, Lviv National Agrarian University, Ukraine;
Ali Al-ZUBIEDY, University of Babylon, Iraq;
Pavol FINDURA, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovak Republic;
Mukrimin GUNEY, Giresun University, Turkey;
Juozas PADGURSKAS, Vytautas Magnus University, Lithuania;
Tadeusz JULISZEWSKI, University of Agriculture in Krakow, Poland;
Pawel KIELBASA, University of Agriculture in Krakow, Poland;
Pavel MÁCHAL, Mendel University in Brno, Czech Republic;
Till MEINEL, Cologne University of Applied Sciences, Germany;
Yuri MELNIK, State Agrarian University of Moldova, Moldova;
Mitko NIKOLOV, Angel Kanchev University of Ruse, Bulgaria;
Jan TURAN, University of Novi Sad, Serbia.

Розділ 1

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТІВ, СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАТЕРІАЛІВ І СИРОВИНИ

УДК 631.358; 634.51

РОЗМІРНІ ПОКАЗНИКИ СКЕЛЕТНИХ ГІЛОК ДЕРЕВ ВОЛОСЬКОГО ГОРІХА

Роман Крупич¹, к. т. н., Лариса Кузенко², к. т. н., Степан Крупич³,
Степан Левко¹, Олег Крупич¹, к. т. н.

¹Львівський національний аграрний університет,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: krupych.robota@gmail.com

²Львівський центр професійно-технічної освіти державної служби зайнятості,
вул. Княгині Ольги, 122, м. Львів, Україна,
e-mail: kuzenko.lm@gmail.com

³Національний науковий центр «Інститут механізації
та електрифікації сільського господарства»,
вул. Вокзальна, 11, смт Глеваха, Васильківський р-н, Київська обл., Україна,
e-mail: sodisshhc@gmail.com

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.005>

Крупич Р., Кузенко Л., Крупич С., Левко С., Крупич О. Розмірні показники скелетних гілок дерев волоського горіха

У статті розглянуто наукову проблему з визначення розмірних показників скелетних гілок дерев горіха волоського, тобто кількості ярусів та скелетних гілок на дереві; діаметра скелетних гілок в основі – місці з'єднання зі скелетною гілкою нижчого порядку чи центральною провідником; максимальної довжини гілок; відстані захвату, вимірюваної як відстань від основи гілки до місця прикладання збурювального зусилля; кута сходження, що характеризує зміну діаметра гілки за довжиною; діаметра гілки в місці захвату; кута відгалуження скелетної гілки від центрального провідника, що дозволяє обґрунтувати конструктивні й технологічні параметри ручних і тросових струшувачів вібраційної та віброударної дії.

Встановлено, що розмірні показники скелетних гілок дерев горіха волоського залежать від віку дерев, умов їх росту й обрізки, яка передбачає вкорочення плодкових гілок та прорідження крони. У наведених дослідженнях розглянуто скелетні гілки дерев високопродуктивних сортів горіха волоського Буковинський 1, Чернівецький 1 і Яблунівський Придністровської дослідної станції садівництва Інституту садівництва Національної академії аграрних наук України (НААНУ).

Для проведення замірів використано відомі вимірювальні прилади: штангенциркуль SIGMA; лазерний вимірювач відстані (далекомір) DW040P; кутомір Skil0580AA.

У досліджуваних садах переважали дерева з покращеною ярусною кроною, де виражено три-чотири яруси, причому на двох нижніх – сформовано по три чи чотири скелетні гілки, а на верхніх ярусах по дві-три. У дерев віком до 10 років кількість скелетних гілок першого і другого порядків становить 7–8, а у дерев 40 років зростає до 15–17 штук.

З віком діаметри гілок D_0 в основі та кути відгалуження α_0 зростають, причому більші значення відповідають гілкам нижніх ярусів, а менші – верхніх ярусів. У дерев віком 10 років середні значення діаметра скелетних гілок в основі становлять 48,7 мм, кута відгалуження – 46,1°, а в 40 років – 78,3 мм та 61,6°. Скелетні гілки з діаметром в основі D_0 поділено на дві розмірні групи: перша – 50–70 мм, друга – 70–90 мм. Довжина гілок L_0 першої розмірної групи варіює в діапазоні 2,54–3,22 м, другої – $L_0 = 2,86–3,94$ м, а кут β_0 сходження поперечного перерізу гілок – 0,42–0,63°. Діаметр d_0 в місці захвату гілок зростає зі збільшенням їх діаметра D_0 в основі та зменшенням відстані захвату ℓ_0 та варіює в діапазоні 24,1–45,3 мм.

Ключові слова: дерево, волоський горіх, скелетна гілка, розмірні параметри.

Krupych R., Kuzenko L., Krupych S., Levko S., Krupych O. Study of the dimension indices of skeletal branches of a walnut tree

The article deals with the scientific problem of determination of the dimensional parameters of skeletal branches of walnut trees, namely the following parameters: the number of layers and skeletal branches on a tree; the diameter of skeletal branches (boughs) at the base; maximum length of branches; distance to the place of effort; angle of convergence of

branches; the diameter of a branch at the point of capture; the branching angle of the skeletal branch from the central limb. It is established that dimensions of skeletal branches of a walnut tree depend on the tree age, its growth conditions, and pruning. The study of the skeletal branches of walnut trees was performed on the Bukovynskyi 1, Chernivetskyi 1 and Yablunivsky varieties of Prydnistrovska Horticultural Research Station of the Horticulture Institute of the National Academy of Agrarian Sciences in Ukraine.

The known measuring instruments, i.e. the SIGMA sliding calipers; DW040P laser distance meter (range finder); Skil0580AA goniometer were used for measuring.

On the trees up to 10 years old, the number of skeletal branches of the first and second orders is 7 – 8, and on trees of 40 years, it increases to 15 – 17 pieces. On the older trees, the diameters of the branches at the base and the branching angles increase, with larger values corresponding to the branches of the lower layers, and smaller ones to the upper layers. On the 10-year-old trees, the average diameter of the skeletal branches at the base is 48,7 mm, the branch angle – 46,1 °, and on 40-year-old trees – 78,3 mm and 61,6 ° respectively. The skeletal branches with D , diameter in the base are divided into two size groups: the first – 50 – 70 mm, the second – 70 – 90 mm. The length of the branches of the first size group varies within 2,54 – 3,22 m, the second – within 2,86 – 3,94 m, and the angle of convergence of the cross-section of the branches – 0,42 – 0,63 °. The diameter of the branches at the point of capture varies within 24,1 – 45,3 mm.

The results of study substantiation of the design and technological parameters of hand and cable vibration and vibration shock shakers.

Key words: walnut tree, skeletal branch, dimensional parameters.

Постановка проблеми. Зростання площ волоського горіха в Україні вимагає механізації всіх технологічних процесів, особливо під час проведення збиральних робіт [2; 3]. Повна механізація збирання передбачає використання плодозбиральних машин, що струшують дерево за штаб чи центральний провідник, з наступним вловлюванням та затарюванням плодів (горіхів). Плодозбиральні машини складні за конструкцією, можуть пошкоджувати дерево, дорого вартують і не завжди економічно доцільні для малих площ [1; 7; 13]. Для таких умов доречно використовувати ручні струшувачі віброударної дії, що діють на окремі скелетні гілки дерева [10–13; 15; 20]. Для обґрунтування конструктивних параметрів таких струшувачів необхідно дослідити розмірні показники скелетних гілок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дерева плодкових культур висаджують у садах з різними схемами посадки відповідно до запропонованого типу дерев та вибраної технології. Це можуть бути інтенсивні сади зі схемою посадки $3 \times 1,5$ м або класичні сади зі схемою 6×4 м. Переважну більшість технологічних операцій виконують механізованим способом з використанням спеціальних знарядь, пристосованих до роботи в садах з різними схемами посадки [1–3; 7].

Для обґрунтування основних конструктивних і технологічних параметрів агрегатів необхідно визначити розмірні параметри дерев та їх елементів (скелетних гілок). Проведені широкі дослідження розмірних параметрів плодкових дерев яблуні, груші, вишні, сливи. Автори [5; 19] досліджували висоту дерев, ширину крони впоперек і вздовж ряду, висоту й діаметр штамба

та центрального провідника і не приділяли уваги скелетним гілкам, бо спеціалізувались на розробці плодозбиральних машин, що рухались в міжрядді саду і струшували плоди дією на штаб чи центральний провідник.

Для збирання яблук у тракторонедоступних місцях запропоновано ручні вібраційні струшувачі, що знімають плоди передачею збурювальних зусиль скелетним гілкам першого та другого порядків. Розробники ручних вібраційних струшувачів звернули увагу на дослідження розмірних параметрів скелетних гілок яблуні для обґрунтування параметрів струшувачів [10; 11].

Волоські горіхи можна висаджувати окремими насадженнями або закладати промислові сади. Промислові насадження волоського горіха розташовують кварталами площею 10 га з утворенням вільних міжквартальних провітрюваних смуг. У зв'язку з інтенсифікацією садівництва пропонуються загущені посадки, однак у разі закладання горіхових садів під час визначення схеми посадки необхідно враховувати, що дерева волоського горіха довговічні і стабільно плодоносять понад 100 років, а діаметр крони може перевищувати 20 м. Дерева швидко ростуть, особливо в перші роки, освоюючи площу саду. Тому для промислових садів рекомендують такі схеми посадки: сильнорослі дерева – 17×15 , 14×12 , 13×11 , 12×12 , 10×10 м; середньорослі – 10×8 , 10×7 , 10×6 , 9×7 м і слаборослі – 8×6 , 8×5 , 7×6 , 7×5 м. Якщо площа живлення одного дерева $100 - 255 \text{ м}^2$, на 1 га висаджують 40 – 100 дерев, $60 - 80 \text{ м}^2 - 125 - 170$ дерев, $35 - 48 \text{ м}^2 - 200 - 300$ дерев [9; 14; 16].

Збирання волоських горіхів можна проводити плодозбиральними машинами або ручними віброударними струшувачами. Для цього необ-

хідно визначити розмірні параметри дерев та їх елементів (скелетних гілок) [13; 15; 20–22].

Постановка завдання. Збирання волоських горіхів можна проводити плодозбиральними машинами, що пристосовані до передачі збурювальних зусиль штамбам та центральним провідникам дерев. З віком штамби та центральні провідники дерев волоського горіха значно збільшуються в розмірах, особливо в діаметрі, що приводить до зростання їх жорсткості. Використання вібраційних збурювачів коливань стає неможливим. У цьому разі доцільне струшування горіхів передачею збурювальних зусиль скелетним гілкам першого та другого порядків зі значно меншою жорсткістю, що залежить від діаметра гілки в основі, відстані захвату, тобто відстані від місця передачі збурювальних зусиль до основи гілки.

Для збурення коливань можна використовувати ручні й тросові струшувачі вібраційної та віброударної дії.

Тому метою досліджень є визначення розмірних показників скелетних гілок волоського горіха, а саме: кількість ярусів та скелетних гілок на дереві; діаметр скелетних гілок в основі – місці з'єднання зі скелетною гілкою нижчого порядку чи центральним провідником; максимальна довжина гілок; відстань захвату, вимірювана як відстань від основи гілки до місця прикладання збурювального зусилля; кут сходження, що характеризує зміну діаметра гілки в довжину; діаметр гілки в місці захвату; кут відгалуження скелетної гілки від центрального провідника.

Виклад основного матеріалу. Досліджували дерева високопродуктивних сортів горіха волоського Буковинський 1, Чернівецький 1 і Яблунівський Придністровської дослідної станції садівництва Інституту садівництва Національної академії аграрних наук України (НААНУ). Ці сорти придатні для вирощування на всій території України, включаючи й західні області, тому занесені до реєстру горіхових сортів України і рекомендовані для виробництва [8]. Дослідження проводили на базі Придністровської дослідної станції садівництва, що у Сторожинецькому районі Чернівецької області, а також у Львівському національному аграрному університеті. Під час експериментів використовували відомі [18] та розроблені методики, прилади й допоміжне обладнання.

За програмою досліджень визначали: кількість ярусів та скелетних гілок на дереві; діаметр скелетних гілок D_2 в основі (рис. 1) – місці з'єднання зі скелетною гілкою нижчого порядку чи центральним провідником; максимальну довжину

гілок L_2 ; відстань захвату l_2 , вимірювану як відстань від основи гілки до місця прикладання збурювального зусилля; кут сходження β_2 (рис. 2), що характеризує зміну діаметра гілки d_2 за довжиною; d_{l_2} – діаметр гілки в місці захвату; кут відгалуження α_2 (див. рис. 1) скелетної гілки від центрального провідника.

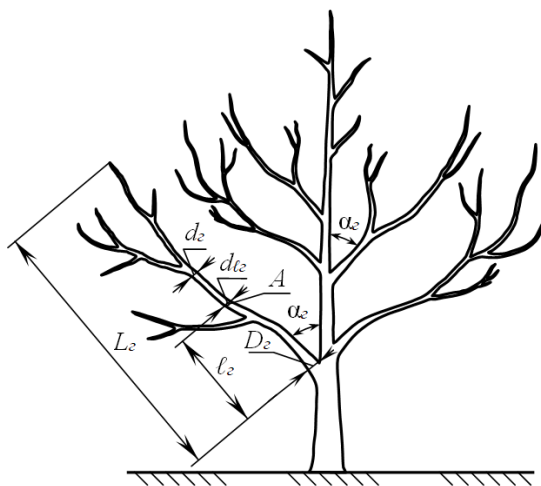


Рис. 1. Схема крони горіха волоського *

* A – місце захвату (прикладання збурювального зусилля)

Fig. 1. Scheme of walnut crown *

* A – place of capture (exertion of exerting force)

Скелетні гілки першого та другого порядків можна розглядати як консольну балку змінного перерізу діаметром d_2 (див. рис. 2), діаметром в основі D_2 та довжиною L_2 . На відстані захвату l_2 , що змінюється в певних межах, діаметр перерізу d_{l_2} .

Від розмірів кожної скелетної гілки залежать частота її власних коливань і коефіцієнт згасання коливань, а зведені маса й коефіцієнт жорсткості визначаються як розмірами, так і відстанню захвату l_2 .

Діаметри гілок в основі D_2 та за довжиною d_2 розраховували як середнє арифметичне значення замірів цих показників у двох взаємно перпендикулярних площинах. Дослідження здійснювали за допомогою штангенциркуля SIGMA з точністю вимірювання 0,01 мм й електронною фіксацією показів (рис. 3, а).

Для визначення максимальної довжини гілок L_2 та відстані захвату l_2 використано лазерний вимірювач відстані (далекомір) DW040P фірми DeWALT (рис. 3, б) з такими характеристиками: клас лазера 2, діапазон вимірювань 0,3 – 40 м; похибка вимірювань 0,1 мм/м. Технічна характеристика вимірювача дозволяє визначити показники крони горіха волоського з необхідною точністю.

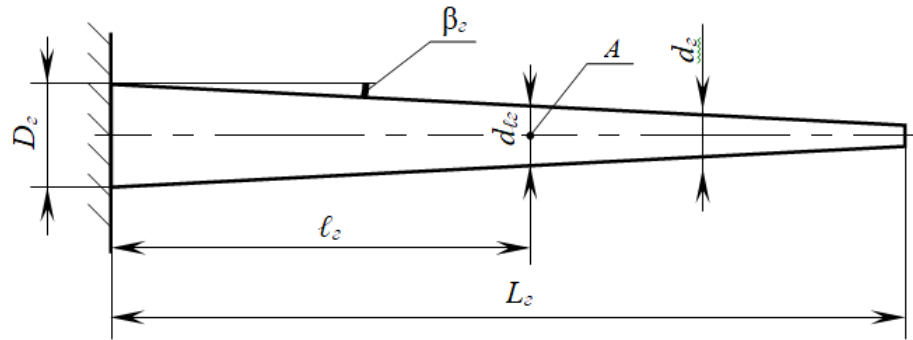


Рис. 2. Зведена схема скелетної гілки у вигляді консольної балки змінного перерізу

Fig. 2. The summary scheme of skeletal branch is presented in the form of a cantilever beam of variable cross-section



Рис. 3. Прилади для вимірювання розмірних показників крони горіха волоського: а – штангенциркуль SIGMA; б – лазерний вимірювач відстані (далекомір) DW040P; в – кутомір Skil0580AA

Fig. 3. Instruments for measuring the dimensions of the walnut crown: а – calipers SIGMA; б – laser distance meter (range finder) DW040P; в – goniometer Skil0580AA

Відстань між двома точками визначається світловим променем вимірювача, що кріпився в основі досліджуваної гілки, впираючись у центральний провідник крони чи гілку нижчого порядку. Після увімкнення лазерного вимірювача його світловий промінь спрямовували на відбивну відмітку, яка монтувалася на відстані вимірювання. Якщо відмітка розташовувалася на завершенні гілки, то визначали її довжину L_2 , а в місці захвату – відстань захвату l_2 . Шукана відстань відображалася на дисплеї вимірювача. Досліджували скелетні гілки першого та другого порядків нижніх ярусів крони горіха волоського.

Кут відгалуження α_2 скелетних гілок від центрального провідника крони визначали за допомогою кутоміра марки Skil0580AA (рис. 3, в), який виконує заміри від 0° до 220° з точністю $\pm 0,5^\circ$ і фіксує отримані результати на цифровому екрані. У базову рейку кутоміра вмонтовані рідинні рівні, що дозволяє цю рейку встановлювати в горизонтальне чи вертикальне положення.

Базову рейку кутоміра суміщали з поверхнею центрального провідника, від якої йшло відгалуження скелетної гілки. Рухому рейку відхиляли до суміщення з поверхнею відгалуженої гілки й на цифровому екрані фіксували кут α_2 .

Кут сходження β_2 гілки (див. рис. 2) встановлювався як кут нахилу твірної конічної поверхні, що охоплює поверхню гілки. Цей кут характеризує зміну діаметра перерізу гілки d_2 на відстані l_2 від основи D_2 і визначається за формулою

$$\beta_2 = \arctg \frac{D_2 - d_2}{2l_2} \quad (1)$$

Кут сходження розраховували в п'яти точках для різних значень відстані l_2 в межах 1,25 – 2,25 м. Приймали середнє арифметичне значення залежно від кількості проведених замірів.

Згідно з формулою (1) діаметр гілки в місці прикладання збурювального зусилля на відстані l_2 дорівнює

$$d_2 = D_2 - 2l_2 \operatorname{tg} \beta_2 \quad (2)$$

Параметри крони горіха волоського та розмірні характеристики скелетних гілок діаметром в основі 50, 60, 70, 80 і 90 мм визначали на 30 деревах кожного досліджуваного сорту віком від 10 до 40 років у триразовій повторності.

З віком (а плодоношення дерев волоського горіха може тривати до ста років і більше [4; 6]) необхідно видаляти непродуктивні гілки, у тому числі скелетні першого та другого порядків, для їх заміщення молодими й більш продуктивними.

У перші роки догляду за садом формуються крони дерев; як правило, волоському горіху притаманні три типи крони: без'ярусна, покращена ярусна і чашоподібна [17]. У досліджуваних садах переважали дерева з покращеною ярусною кроною, де виражено три-чотири яруси, причому на двох нижніх сформовано по три чи чотири скелетні гілки, а на верхніх ярусах – по дві-три. Також окремі дерева мали без'ярусну й чашоподібну крону.

Для використання ручних чи тросових струшувачів плодів важлива кількість скелетних гілок першого і другого порядків, яким можна передавати збудувальне зусилля. Ця кількість залежить від величини крони, що розростається з часом. Так, у дерев віком до 10 років можна передавати збудувальне зусилля й центральному провіднику, а у старших дерев – лише скелетним гілкам першого і другого порядків, кількість яких у дерев віком 10 – 40 років змінюється від 7 – 8 до 15 – 17 штук. Наявність гілок регулюють обрізкою, що передбачає прорідження крони і формування розгалужених скелетних гілок, тобто збільшення масиву гілок вищих порядків, на яких формуються плоди [17]. Продуктивність ручних струшувачів залежить від кількості скелетних гілок, з яких збирають плоди. З урахуванням урожайності дерев розраховують затрати коштів і праці на збирання та обґрунтовують економічну ефективність запропонованого струшувача.

Визначені діаметр скелетних гілок D_2 в основі і кут відгалуження α_2 гілок першого порядку від центрального провідника дерев волоського горіха наведено у табл. 1.

З віком діаметри гілок D_2 в основі та кути відгалуження α_2 зростають, причому більші значення відповідають гілкам нижніх ярусів, а менші – верхніх. Дослідження показали, що діаметри скелетних гілок першого і другого порядків змінюються в межах 39,4 – 92,1 мм. У дерев віком 10 років середні значення діаметра становлять 48,7 мм, а в 40 років – 78,3 мм. Коливання цього показника в межах вікової групи незначне, на що вказує коефіцієнт варіації – 10,45 % для десятирічних дерев і 17,36 % – сорокарічних. З

віком також зростає діапазон зміни діаметра скелетних гілок першого і другого порядків.

Куту відгалуження α_2 скелетних гілок від центрального провідника притаманна закономірність зміни, що аналогічна діаметру D_2 . Значення цього кута закладаються під час формування крони молодого дерева і повинні становити не менше ніж 45° для забезпечення доцільного розташування гілок відносно центрального провідника. З часом довжина і маса гілок зростають, що зумовлює їх прогинання і збільшення кута відгалуження. Окрім того, з ростом дерев і збільшенням крони скелетні гілки вищих ярусів відгалужуються від центральних провідників під меншим кутом. У дерев віком 10 років кут відгалуження змінюється від $42,4$ до $49,3^\circ$ за середнього значення $46,1^\circ$ й коефіцієнта варіації 6,04 %, а для сорокарічних дерев такі показники становлять: діапазон зміни $51,7$ – $68,3^\circ$, середнє значення $61,6^\circ$, коефіцієнт варіації 10,27 %.

Довжина гілок L_2 (табл. 2) залежить від щорічного приросту і відповідає їх діаметру D_2 в основі, зі збільшенням якого зростає й довжина гілок. Враховуючи максимальне значення довжини та відстань ℓ_2 захвату гілок, на якій накладається захват i , відповідно, передається збудувальне зусилля, скелетні гілки першого і другого порядків доцільно розділити на дві групи. До першої належать гілки діаметром в основі 50 – 70 мм, довжина L_2 яких змінюється в діапазоні 2,54 – 3,22 м за коефіцієнта варіації 5,21 – 5,63 %, а відстань захвату ℓ_2 гілок становить 1,57 – 2,26 м, де вказаний коефіцієнт V дорівнює 5,32 – 8,67 %. Друга група – це гілки діаметром 70 – 90 мм, довжина яких перебуває в межах 2,86 – 3,94 м, V – 5,63 – 6,09 %, відстань захвату – 1,99 – 2,78 м, V – 4,69 – 6,11 %.

Модель скелетних гілок першого і другого порядків можна подати у вигляді зрізаного конуса (див. рис. 2), що характеризується кутом сходження β_2 . Як показали дослідження, вказаний кут (рис. 4) збільшується відповідно до приросту гілки і залежить від її діаметра D_2 (мм) в основі:

$$\beta_2 = -953,546 \cdot 10^{-7} D_2^2 + 186,116 \cdot 10^{-4} D_2 - 268,574 \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

У гілок діаметром в основі 30 – 90 мм кут сходження β_2 збільшується від $0,21^\circ$ до $0,63^\circ$, якщо ж діапазон діаметра гілок 50 – 90 мм, то кут сходження перебуває в межах $0,41$ – $0,63^\circ$. Мінімальне значення цього кута $0,21^\circ$ відповідає гілкам діаметром в основі 30 мм, а максимальне $0,63^\circ$ – діаметру 90 мм.

Таблиця 1. Діаметр і кут відгалуження скелетних гілок першого та другого порядків дерев волоського горіха**Table 1.** The diameter and the branching angle of the skeletal branches of the first and second orders walnut tree

Показник	Статистичні характеристики		Вік дерев, років			
			10	20	30	40
Діаметр гілок в основі D_2	Значення, град	мінімальне	39,4	48,7	54,9	58,4
		максимальне	53,4	71,8	85,7	92,1
		середнє	48,7	63,5	71,3	78,3
	середнє квадратичне відхилення, мм		5,087	9,659	11,58	13,591
	коефіцієнт варіації, %		10,45	15,21	16,24	17,36
Кут відгалуження гілок першого порядку α_2	Значення, град	мінімальне	42,4	46,6	49,3	51,7
		максимальне	49,3	57,1	63,7	68,3
		середнє	46,1	52,8	57,9	61,6
	середнє квадратичне відхилення, °		2,784	4,029	5,482	6,325
	коефіцієнт варіації, %		6,04	7,63	9,47	10,27

Таблиця 2. Довжина скелетних гілок першого та другого порядків дерев волоського горіха**Table 2.** The length of the skeletal branches of the first and second orders walnut tree

Діаметр гілок в основі D_2 , мм	Статистичні характеристики				
	значення, м			середнє квадратичне відхилення, м	коефіцієнт варіації, %
	мінімальне	максимальне	середнє		
	довжина гілок L_2				
50	2,54	2,83	2,69	0,14	5,21
60	2,69	3,03	2,84	0,153	5,37
70	2,86	3,22	3,03	0,171	5,63
80	3,09	3,48	3,28	0,191	5,81
90	3,41	3,94	3,61	0,221	6,09
відстань захвату ℓ_2					
50	1,57	1,91	1,76	0,153	8,67
60	1,79	2,02	1,92	0,102	5,32
70	1,99	2,26	2,13	0,13	6,11
80	2,24	2,47	2,35	0,11	4,69
90	2,47	2,78	2,62	0,15	5,73

Враховуючи відомі значення кута сходження β_2 та діаметра гілок D_2 в основі, за формулою (2) визначено діаметри d_2 на відстані захвату ℓ_2 гілок.

Для гілок першої розмірної групи діаметром D_2 в основі 50–70 мм відстань захвату ℓ_2 змінювалась від 1,25 до 1,75 м, а для другої розмірної групи ($D_2 = 70–90$ мм) відстань ℓ_2 дещо більша – 1,75–2,25 м.

На основі отриманих даних побудовані поверхні відгуку діаметра гілок d_2 в місці захвату

від їх діаметра в основі D_2 та відстані захвату ℓ_2 (рис. 5 а, б), причому ці поверхні відповідають залежностям d_2 , мм, за умови дійсних значень змінних для двох розмірних груп гілок:

перша ($D_2 = 50–70$ мм; $\ell_2 = 1,25–1,75$ м):

$$d_2 = 16,9889 + 0,4417 D_2 - 3,2 \ell_2 + 0,0047 D_2^2 + 0,2667 \ell_2^2 - 0,25 D_2 \ell_2 ; \quad (3)$$

друга ($D_2 = 70–90$ мм, $\ell_2 = 1,75–2,25$ м):

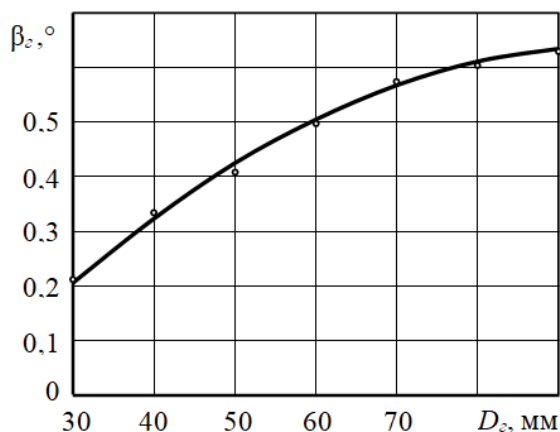


Рис. 4. Залежність кута сходження β_c гілок волоського горіха від їх діаметра D_c в основі

Fig. 4. Dependence of the angle of convergence β_c of walnut branches on their diameter D_c at the base

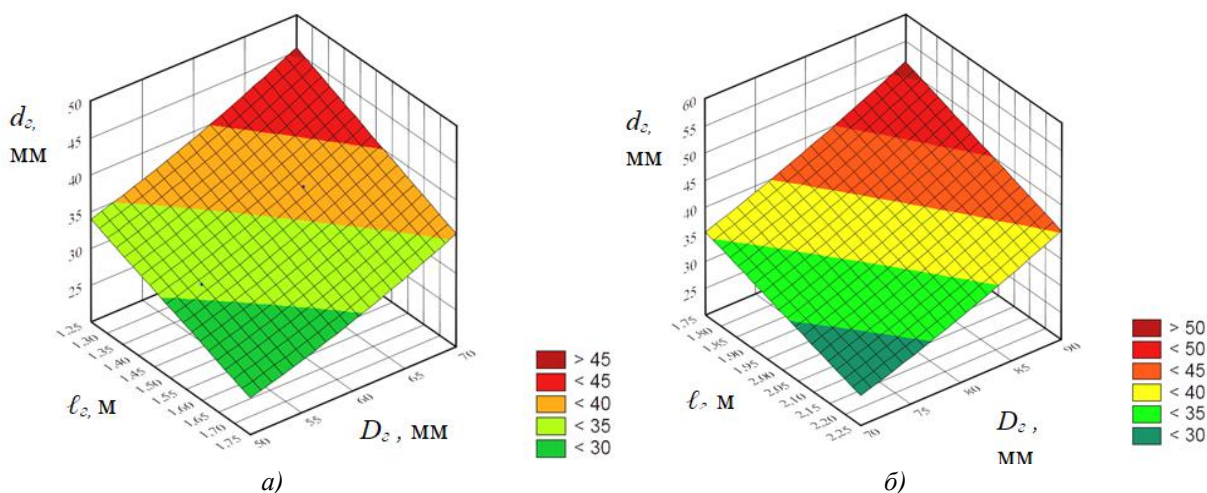


Рис. 5. Поверхні відгуку діаметра d_c в місці захвату гілок першої (а) і другої (б) розмірних груп від діаметра гілок D_c в основі та відстані l_c захвату

Fig. 5. Response surfaces of the diameter d_c at the point of capture of the branches of the first (a) and second (b) size groups of the diameter of the branches D_c at the base and distance l_c of the capture

$$d_c = 44,9778 - 0,0883 D_c - 13,6 l_c + 0,0068 D_c^2 + 0,5333 l_c^2 - 0,12 D_c l_c \quad (4)$$

Діаметр d_c в місці захвату гілок зростає зі збільшенням їх діаметра D_c в основі та зменшенням відстані захвату l_c . Для першої розмірної групи гілок діаметром в основі 50–70 мм, якщо відстань захвату 1,25–1,75 м, діаметр d_c змінюється в діапазоні 24,1–45,3 мм. Найменше значення цього діапазону відповідає $D_c = 50$ мм і $l_c = 1,75$ м, а найбільше – $D_c = 70$ мм і $l_c = 1,25$ м.

Аналогічна закономірність спостерігається й для гілок другої розмірної групи діаметром в

основі 70–90 мм за умови відстані захвату 1,75–2,25 м. Відповідно діаметр d_c зростає від 25,5 до 51,3 мм, причому більше значення відповідає $D_c = 90$ мм й $l_c = 1,75$ м, а менше – $D_c = 70$ мм і $l_c = 2,25$ м.

Висновки

1. Досліджували скелетні гілки першого і другого порядків дерев горіха волоського віком від 10 до 40 років. Отримані результати показали, що розмірні показники таких дерев змінюються в широкому діапазоні.

2. З віком діаметри гілок D_c в основі та кути відгалуження α_c зростають, причому більші значення відповідають гілкам нижніх ярусів, а

менші – верхніх. У дерев віком 10 років середні значення діаметра скелетних гілок в основі становлять 48,7 мм, кута відгалуження – 46,1°, а в 40 років – 78,3 мм та 61,6°.

3. Враховуючи діапазони зміни показників механіко-технологічних властивостей скелетних гілок, за діаметром в основі D_2 їх поділено на дві розмірні групи: перша – 50–70 мм, друга – 70–90 мм. Довжина гілок L_2 першої розмірної групи варіює в діапазоні 2,54–3,22 м, другої – $L_2 = 2,86–3,94$ м, а кут β_2 сходження поперечного перерізу гілок – 0,42–0,63°.

4. Діаметр d_2 в місці захвату гілок зростає зі збільшенням їх діаметра D_2 в основі та зменшенням відстані захвату ℓ_2 та варіює в діапазоні 24,1–45,3 мм.

Бібліографічний список

1. Аниферов Ф. Е., Ерошенко Л. И., Теплинский И. З. Машины для садоводства. 2-е изд., перераб. и дополн. Ленинград: Агропромиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 304 с.
2. Бабій П. Т. Механізація виробництва плодів і ягід. 2-ге вид., допов. і перероб. Київ: Урожай, 1980. 160 с.
3. Варламов Т. П., Четвертаков А. В. Механизация уборки и товарной обработки фруктов. Москва: Колос, 1984. 287 с.
4. Волоський горіх. URL: <http://gorihvod.blogspot.com/2012/11/80-90.html> (дата звернення: 20.03.2018).
5. Гошко З. О. Дослідження технологічного процесу збирання плодів тросовим струшувачем віброударної дії: дис. ... канд. техн. наук. Луцьк, 1995. 263 с.
6. Грецкий орех: пособие / под. общ. ред. А. В. Чернякова, С. Ю. Хохлова; Национальная общественная организация «Украинская ореховая ассоциация». Киев: Тимирязевское, 2014. 96 с.
7. Демидко М. Е., Беренштейн И. Б. Механизация интенсивного садоводства. Киев: Урожай, 1970. 144 с.
8. Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні на 2018 рік. Київ, 2018. С. 402–403. URL: http://www.minagro.gov.ua/system/files/Реєстр_сортів_рослин_України_станом_на_06.03.2018.pdf (дата звернення: 19.03.2018).
9. Затоковський Ф. Т., Сатіна Л. Ф., Сатіна Г. М. Стан і перспективи розвитку горіха грецького в регіоні Карпат. *Проблеми агропромислового комплексу Карпат: міжвід. темат. зб.* В. Бакта, 2004. Вип. 13–14. С. 119–123.
10. Иванченков В. А. Изыскание и исследование энергосберегающей установки для уборки плодов с деревьев в крестьянских (фермерских) хозяйствах: дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2006. 187 с.
11. Какауридзе А. А. Разработка и обоснование устройств для уборки плодов на тракторонедоступных участках: дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 1988. 241 с.
12. Крулич Р. О. Розширення технологічних можливостей ручних струшувачів плодів. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2014. № 18. С. 61–68.
13. Кулибеков Г. М. Уборка грецких орехов с крупноштабных деревьев машиной с импульсным вибровозбудителем: дис. ... канд. техн. наук. Кировобад, 1984. 234 с.
14. Малиновський Б. Принципи посадки саду волоських горіхів. *Пропозиція*. URL: <http://propozitsiya.com.ua/principy-posadki-orehovogo-sada> (дата звернення: 20.03.2018).
15. Ручний віброударний струшувач плодів: пат. 95453 Україна: МПК А01D 46/26. № u201407346; заявл. 01.07.14; опубл. 25.12.14, Бюл. № 24. 6 с.
16. Сатіна Г. М. Врахування досвіду Угорщини у вирішенні проблеми промислового вирощування горіха грецького. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства*. 2004. Вип. 25. С. 126–132.
17. Стрела Т. Е. Орех грецкий / отв. ред. К. М. Сытник. Киев: Наук. думка, 1990. 192 с.
18. Физико-механические свойства древесины, почв и удобрений. Методы исследований, приборы, характеристика. Москва: Колос, 1970. С. 2–185.
19. Шевчук Р. С. Процессы и средства механизации съема плодов: дисс. ... д-ра техн. наук. Москва, 2000. 532 с.
20. Шевчук Р. С., Крулич Р. О. Ручной виброударный стряхиватель плодов. *MOTROL Comission of motorization and energetics in agriculture*. 2015. Vol. 17, No. 4. P. 101–107.
21. Economical shaker VHB – D – E – F for fruit and nuts trees. AMB ROUSSET is a French company. URL: <https://www.amb-rousset.com/wp-content/uploads/2013/04/vhe-aud-105-009237-0c.pdf> (Last accessed: 27.03.2018).
22. Fruit harvesting machine: pat. 09333015 European: A01D46/26. № 99400203.8; declared 28.01.99; published by 04.08.99, Bul. № 1999/31. 18 p.

Стаття надійшла 07.10.2019

Розділ 2
МАШИНИ ТА РОБОЧІ ПРОЦЕСИ
АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 531.8

**КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ВАЖІЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ
З ВНУТРІШНЬОЮ УРУХОМЛЮВАЛЬНОЮ ЛАНКОЮ**

В'ячеслав Пасіка¹, д. т. н., Петро Коруняк², к. т. н.

¹*НУ «Львівська політехніка»,
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна,
e-mail: paswr@meta.ua*

²*Львівський національний аграрний університет,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н,
Львівська обл., Україна,
e-mail: petrokoruniak@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.013>

Пасіка В., Коруняк П. Кінематичний аналіз важільного механізму з внутрішньою урухомлювальною ланкою

У роботі розглянуто механізм з внутрішньою урухомлювальною ланкою, який використовують у багатьох різноманітних машинах. Він є основним механізмом підймальних автомобільних кранів з гідравлічним урухомником стріли, утворює складну механічну систему урухомлення відвалів, ковшів та іншого навантажувального обладнання колісних та гусеничних тракторів.

У розглядуваному механізмі урухомлювальний шток може рухатися зворотно-поступально відносно гідроциліндра та шарнірно з'єднаний з коромислом. Своєю чергою, гідроциліндр і коромисло приєднані шарнірно до стояка. Під дією тиску рідини шток урухомлює коромисло, яке пов'язане з веденою ланкою.

За крайовими умовами синтезовано найпростіший закон руху штока відносно гідроциліндра (закон рівноспадного пришвидшення). Синтез проведено за умови, що відомі час і максимальне переміщення штока. Із суто геометричних міркувань отримано аналітичні залежності для кутових переміщень гідроциліндра і коромисла залежно від закону руху штока. Аналітичні залежності для кутових швидкостей і пришвидшень ланок визначено на основі теореми про додавання швидкостей і пришвидшень точки у її відносному русі.

Показано, що графіки кутових пришвидшень гідроциліндра й коромисла якісно подібні до графіків відносного пришвидшення штока. Вказано, що на початку і в кінці руху ланок механізму спостерігаються м'які удари, що є небажаним явищем і спричинює появу раптових інерційних навантажень. Висловлено гіпотезу, що подібність графіків можлива і для інших законів руху штока без м'яких ударів. Намічено програму подальших досліджень з метою усунення м'яких ударів у крайніх положеннях штока. Результати роботи можуть бути використані в дослідженнях руху ковшів екскаваторів, стріл автомобільних кранів з гідравлічним урухомником та в інших підймально-навантажувальних і будівельно-дорожніх машинах, а також у виконавчих механізмах промислових роботів. Вони є необхідними для проведення динамічних досліджень.

Ключові слова: неасурова структурна група, внутрішня урухомлювальна ланка, шток, коромисло, гідроциліндр, гідропривід, ківш, екскаватор, кран, кінематичні характеристики.

Pasika V., Koruniak P. Kinematic analysis of lever mechanisms with an internal moving link

The paper studies the mechanism with an internal moving link, which is used in many different machines. It is the main mechanism of cranes with hydraulic actuator of the boom, and it forms a complex mechanical system of steering of dumps, ladles and other loading equipment of wheeled and tracked tractors.

In the studied mechanism, the drive rod may move reciprocating with respect to the cylinder and pivotally coupled to the rocker arm. In its turn, the hydraulic cylinder and the rocker arm are pivotally connected to the riser. Under the action of fluid pressure, the stem drives the rocker arm, associated with the driven link.

Under the boundary conditions, the simplest law of motion of the rod relative to the hydraulic cylinder is synthesized (the law of equal-slow acceleration). The synthesis was performed under the set time and maximum movement of the rod. From the geometric position, the research supplies analytical dependences for angular displacements of the hydraulic cylinder and the rocker arm, depending on the law of motion of the rod. The analytical dependences for the angular velocities and accelerations of the links are determined on the basis of the theorem on the addition of the velocities and accelerations of a point in its relative motion.

It is shown that the diagrams of angular acceleration of the hydraulic cylinder and the rocker arm are qualitatively similar to the diagrams of the relative acceleration of the rod. It is stated that at the beginning and at the end of the movement of links of the mechanism there are mild shocks, which are considered as undesirable phenomena and cause sudden inertial loads. It is hypothesized that the similarity of diagrams is possible for other laws of rod movement without soft blows. A follow-up program is outlined to eliminate soft shocks in the extreme positions of the rod. The results of the work can be used in studies of the movement of buckets of excavators, boom cranes with hydraulic mover, as well as other lifting and loading and construction-road machines, and in the executive mechanisms of industrial robots. They are necessary for dynamic research.

Key words: Non-Assur structural group, internal moving link, rod, rocker arm, hydraulic cylinder, hydraulic actuator, bucket, excavator, crane, kinematic characteristics.

Постановка проблеми. Важливі механізми з внутрішньою урухомлювальною ланкою (ВУЛ) використовують у виконавчих механізмах промислових роботів, у підйимально-навантажувальних і будівельно-дорожніх машинах, тренажерах, симуляторах тощо. Вони є основним механізмом екскаваторів з гідравлічним урухомником, які виробляють різні фірми, наприклад CAT, Volvo, Doosan, Hitachi, Atlas, JCB та ін. Одноковшові екскаватори найбільш затребувані під час проведення земляних робіт у міських умовах, оскільки вони легкі, маневрені і не створюють надмірного акустичного шуму. Щодо автокранів, то без них не обійтись поза населеними пунктами чи в разі виконання невеликих обсягів робіт [1; 2; 4].

Кінематичне дослідження важливих механізмів, в яких початкова ланка є вхідною (урухомлювальною) не становить жодних труднощів і описане в багатьох підручниках з теорії механізмів і машин [6; 14; 15]. Проте для випадку урухомлювальної внутрішньої ланки такі дослідження у доступній літературі практично відсутні. Без уміння проводити кінематичний аналіз механізмів із внутрішнім входом неможливо дослідити динамічний стан екскаваторів чи автокранів із гідравлічним урухомником, зробити висновки щодо проектування адаптивних методів керування. Тому кінематичний аналіз є першим етапом дослідження важливих механізмів із ВУЛ багатьох машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Механізми з ВУЛ неможливо класифікувати за Ассуром, тому вони отримали назву неасурових структурних груп [3; 7; 16]. У сучасній літературі обмаль матеріалів, в яких розглянуто кінематичний чи динамічний стан механічних систем з неасуровими структурними групами, хоча розглянутий механізм є основним в екскаваторах з гідравлічним урухомленням ковша, у підйимальних кранах з гідроурухомником стріли, у землерийних машинах тощо [12; 13; 18]. Проте в доступній літературі широко висвітлено питання оптимальних режимів зміни вильоту та підйому і опускання вантажів баштових і мостових кранів [9–11]. У роботі [7] визначено лише особливі по-

ложення неасурових структурних груп без визначення швидкостей і пришвидшень їхніх ланок. У роботах [16; 17] розглянуто точність позиціонування виконавчого органа машини, кінематичний ланцюг якої містить неасурові групи.

Роботи, в яких би проводили кінематичні та динамічні дослідження неасурових структурних груп, авторам невідомі.

Постановка завдання. Наше завдання – на прикладі неасурової групи різноманітних підйимально-навантажувальних машин дослідити рух ланок групи при заданому русі ВУЛ; синтезувати найпростіший закон руху ВУЛ і отримати аналітичні залежності пришвидшень ланок групи від синтезованого закону; проаналізувати отримані залежності кутових пришвидшень; намітити подальший план досліджень.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 наведено урухомлювальний модуль (неасурову групу), який використано в багатьох сучасних колісних та гусеничних екскаваторах різноманітних фірм.

Модуль містить гідроциліндр 1 зі штоком 2 і коромисло 3, до якого послідовно можуть бути приєднані аналогічні модулі. Для більшості відомих екскаваторів кінематична схема руху ковша налічує три таких модулі. Для прикладу на рис. 2 наведено фотографію одноковшового екскаватора фірми Doosan. На ній чітко бачимо три штоки з гідроциліндрами. Отже, механізм урухомлення ковша містить три неасурові структурні групи.

У порожнину гідроциліндра (див. рис. 1, а) подається під тиском рідина, і поковзень з початкового положення A_{10} разом зі штоком 2 переміщується уверх уздовж осі циліндра. На рис. 1, б показано довільне положення гідроциліндра. У такому разі урухомлювальною ланкою є шток 2 (поковзень). Оскільки виділити групи Ассура в такому механізмі неможливо, то застосувати відомі методи кінематичного аналізу важливих механізмів теж неможливо. У зв'язку з цим постало питання визначення кінематичних характеристик механізмів з неасуровими структурними групами.

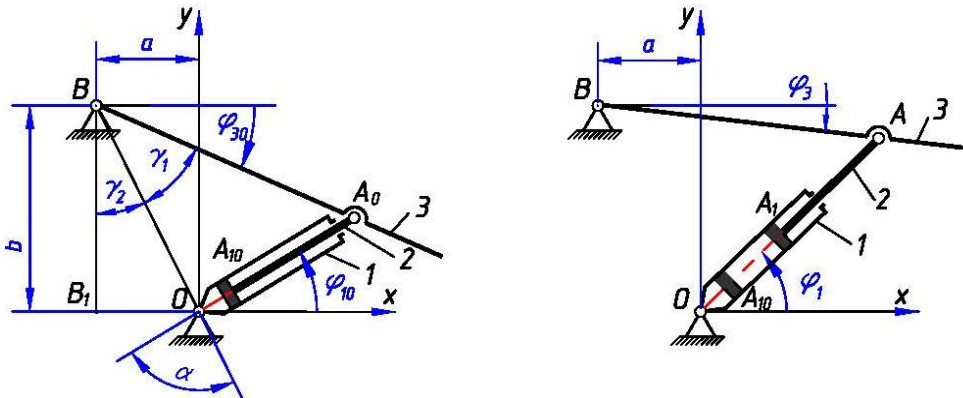


Рис. 1. Неассурова структурна група з внутрішньою урухомлювальною ланкою 2:
 а – початкове положення, б – довільне положення;
 1 – гідроциліндр, 2 – шток, 3 – коромисло

Fig. 1. Non-Assuric structural group with internal moving link 2:
 а – initial position, б – arbitrary position;
 1 – hydraulic cylinder, 2 – rod, 3 – rocker arm



Рис. 2. Одноковшовий екскаватор фірми Doosan

Fig. 2. Doosan single-bucket excavator

Кінематичний аналіз завжди передує силовому і є необхідним етапом дослідження динаміки механічних систем.

Визначимо положення ланок групи. На рис. 1, а показано положення модуля, коли тиск у гідроциліндрі відсутній. Уважаємо геометрію модуля відомою, тобто розміри a , b , l_{AB} і l_{OA_0} – відомі. Хід штока H відносно гідроциліндра визначає конструктор, приймаємо відомим. Також вважаємо відомим і час T , за який шток переміститься на хід H . Відстань l_{OA} між кінематичною парою гідроциліндра O і кінематичною парою штока A постійно змінюється і дорівнює

$$l_{OA} = l_{OA_0} + s(t), \quad (1)$$

де $s(t)$ – закон руху штока відносно гідроциліндра.

З трикутника ΔOBB_1 визначаємо кут

$$\gamma_2 = \text{arctg}(a/b).$$

З трикутника ΔOA_0B визначаємо кут

$$\gamma_1 = \arccos \frac{l_{OB}^2 + l_{AB}^2 - l_{OA_0}^2}{2l_{OB}l_{AB}}.$$

Кут нахилу коромисла до осі абсцис

$$\varphi_3 = -90^\circ + \gamma_1 + \gamma_2. \quad (2)$$

З трикутника ΔOA_0B визначаємо кут

$$\alpha = \arccos \frac{l_{OB}^2 + l_{OA_0}^2 - l_{AB}^2}{2l_{OB}l_{OA_0}}.$$

Кут нахилу осі циліндра до осі абсцис

$$\varphi_1 = 90^\circ + \gamma_2 - \alpha. \quad (3)$$

Отже, положення ланок модуля визначене.

Щоб отримати початкові кути нахилу ланок φ_{10} , φ_{30} , необхідно у залежність (1) підставити $s(t) = 0$.

Важливим питанням, від якого залежатимуть усі інші кінематичні характеристики модуля, є визначення закону руху штока $s(t)$ відносно гідроциліндра. Очевидним є те, що на початку руху переміщення штока і його швидкість дорівнюють нулю. У кінці руху – переміщення штока дорівнює ходу H , а швидкість дорівнює нулю. Таким чином, маємо чотири граничні умови, які накладають на рух штока, і тому найпростіший закон руху можемо подати у вигляді полінома третьої степені:

$$s(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3, \quad (4)$$

де a_i – коефіцієнти, які визначимо з крайових умов:

$$\text{при } \left. \begin{array}{l} t=0 \rightarrow s=0, \quad ds/dt=0; \\ t=T \rightarrow s=H, \quad ds/dt=0. \end{array} \right\} \quad (5)$$

Підставляємо граничні умови (5) у рівняння й отримуємо систему двох алгебричних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів a_2 і a_3 :

$$\left. \begin{array}{l} a_2 T^2 + a_3 T^3 = H; \\ a_2 + 1,5 a_3 T = 0. \end{array} \right\}$$

Ураховуючи, що коефіцієнти a_0 і a_1 дорівнюють нулю, отримуємо такий синтезований закон руху штока відносно циліндра:

$$\begin{aligned} s &= H \frac{t^2}{T^2} \left(3 - 2 \frac{t}{T} \right), \\ v_{21} &= ds/dt = 6H \frac{t}{T^2} \left(1 - \frac{t}{T} \right), \\ a_{21} &= dv_{21}/dt = \frac{6H}{T^2} \left(1 - 2 \frac{t}{T} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

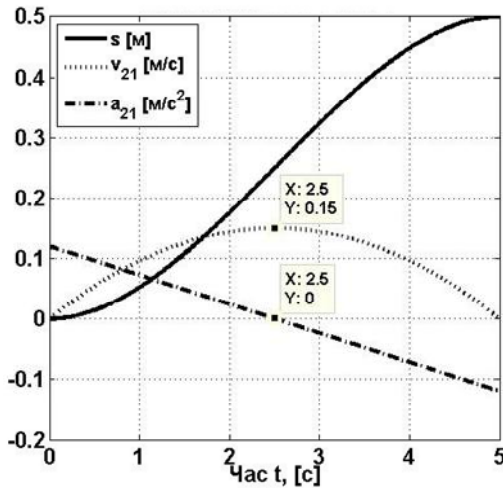


Рис. 3. Кінематичні характеристики синтезованого закону руху

Fig. 3. Kinematic characteristics of the synthesized law of motion

На рис. 3 наведені кінематичні характеристики синтезованого відносного закону руху штока при ході штока $H = 0,5$ м за час $T = 5$ с.

Визначення швидкостей ланок. Найпростіше отримати аналітичні вирази для кутових швидкостей – це застосувати метод Зінов'єва [5] і продиференціювати вирази і за часом. Проте отримати лаконічні аналітичні залежності вкрай важко. Тому запишемо векторний замкнутий контур для швидкостей ланок механізму і

наведемо його графічний розв'язок, з якого й визначимо аналітичні залежності.

Оскільки точка A одночасно належить коромислу і штоку (див. рис. 1), то, використовуючи теорему про додавання швидкостей і пришвидшень у відносному русі точки [8], запишемо векторне рівняння, яке описує швидкість точки A :

$$\vec{v}_A = \vec{v}_A^e + \vec{v}_A^r, \quad (7)$$

де $v_A = \omega_3 l_{AB}$, $v_A^e = \omega_1 l_{OA}$, $v_A^r = v_{21}$ – абсолютна, переносна і відносна швидкості точки A ; ω_1 і ω_3 – невідомі кутові швидкості гідроциліндра зі штоком і коромисла.

На рис. 4 наведений графічний розв'язок рівняння (7) у певному масштабі. Трикутник Δpra прямокутний, у якому відомий катет $pr = v_A^r = v_{21}$. Кут $\varphi^r = \gamma_a - \varphi_1 = \varphi_3 + \pi/2 - \varphi_1$. Тоді з трикутника визначаємо

$$\omega_3 = \frac{v_{21}}{l_{AB} \sin(\varphi_1 - \varphi_3)}, \quad (8)$$

$$\omega_1 = \frac{v_{21} \operatorname{ctg}(\varphi_1 - \varphi_3)}{l_{OA}}. \quad (9)$$

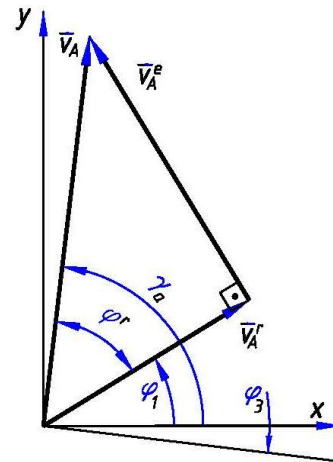


Рис. 4. Замкнутий векторний контур швидкостей

Fig. 4. Closed velocity vector contour

Визначення пришвидшень ланок. Для визначення кутових пришвидшень ланок запишемо рівняння замкнутого векторного контуру для пришвидшення точки A :

$$\vec{a}_A^n + \vec{a}_A^r = \vec{a}_A^e + \vec{a}_A^r + \vec{a}_A^k, \quad (10)$$

де $a_A^n = \omega_3^2 l_{AB}$ – нормальне пришвидшення (відоме), $a_A^r = \varepsilon_3 l_{AB}$ – тангенціальне пришвидшення, ε_3 – невідоме кутове пришвидшення коромисла, $\vec{a}_A^e = \vec{a}_{AO}^e + \vec{a}_{AO}^r$ – переносне пришвидшення, $a_{AO}^n = \omega_1^2 l_{OA}$ – відоме нормальне пришвидшення

точки A навколо точки O , $a_{AO}^r = \varepsilon_1 l_{OA}$ – тангенціальне пришвидшення, ε_1 – невідоме кутове пришвидшення гідроциліндра зі штоком, $a_A^r = a_{21}$, $a_A^k = 2\omega_3 v_{21}$ – відоме Кориолісове пришвидшення.

У рівнянні (10) маємо дві невідомі – ε_1 і ε_3 , які визначимо, спроектувавши його на осі правої системи координат xOy . Після проведення алгебрично-тригонометричних перетворень отримуємо такі вирази для обчислення кутових пришвидшень:

$$\varepsilon_1 = \frac{a_{21} \cos(\varphi_1 - \varphi_3) - 2\omega_1 v_{21} \sin(\varphi_1 - \varphi_3)}{l_{OA} \sin(\varphi_1 - \varphi_3)} - \frac{\omega_1^2 l_{OA} \cos(\varphi_1 - \varphi_3) + \omega_3^2 l_{AB}}{l_{OA} \sin(\varphi_1 - \varphi_3)}, \quad (11)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{a_{21} - \omega_1^2 l_{OA} + \omega_3^2 l_{AB} \cos(\varphi_1 - \varphi_3)}{l_{AB} \sin(\varphi_1 - \varphi_3)}. \quad (12)$$

Для ілюстрації отриманих аналітичних залежностей проаналізуємо рух модуля за таких геометричних даних:

$$\begin{aligned} a &= 0,45 \text{ м}; & b &= 0,9 \text{ м}; \\ l_{OA_0} &= 0,8 \text{ м}; & l_{AB} &= 1,2 \text{ м}; \\ H &= 0,5 \text{ м}; & T &= 5 \text{ с}. \end{aligned}$$

Розміри вибрані довільно, але таким чином, щоб при переміщенні штока відносно гідроци-

ліндра рух гідроциліндра і коромисла був однознаковим, тобто щоб кути нахилу гідроциліндра і коромисла на всьому проміжку постійно зростали. Результати аналізу наведені на рис. 5.

Хочемо зауважити, що правильність отриманих залежностей для обчислення кутових швидкостей і пришвидшень перевіряли числовим методом. При цьому вирази для переміщень і двічі диференціювали і отримані значення кутових швидкостей і пришвидшень зрівнювали зі значеннями, отриманими аналітично. На всьому інтервалі похибка не перевищувала 0,2 %.

Аналізуючи графіки пришвидшень ланок модуля, бачимо, що пришвидшення для обох ланок змінюється майже за лінійним законом, нагадуючи зміну пришвидшення синтезованого закону руху як якісно, так і майже кількісно (див. рис. 3). Оскільки на початку і в кінці руху маємо стрибок пришвидшення, то в цих крайніх положеннях на ланки діятиме так званий м'який удар, що спричинює появу раптових інерційних навантажень. І, хоча кутові пришвидшення ланок невеликі, проте маса ланок у сучасних екскаваторів може досягати тисячі кілограмів і більше. У такому разі момент сил інерції буде значним і може викликати небажані коливні процеси в усьому модулі, включаючи й гідросистему.

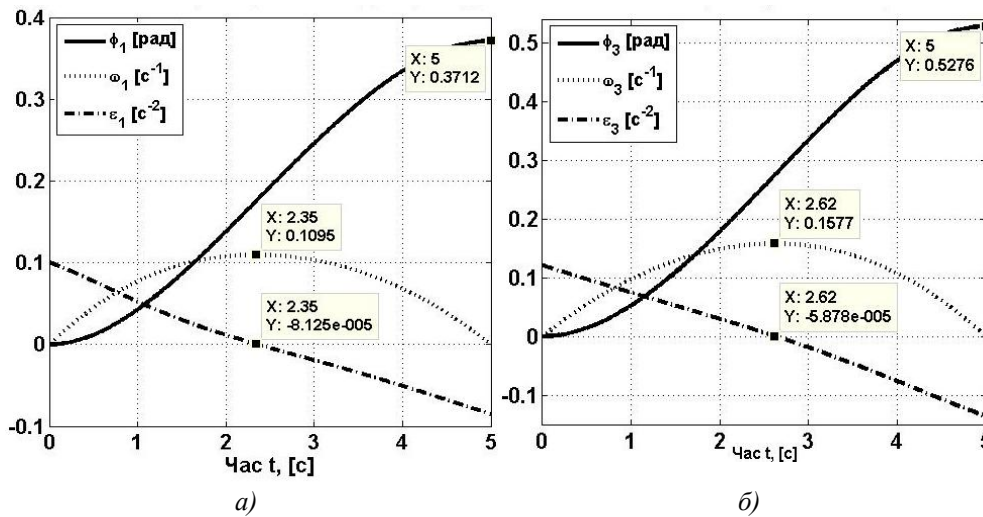


Рис. 5. Кінематичні характеристики ланок модуля: а – гідроциліндра, б – коромисла

Fig. 5. Kinematic characteristics of the links of the module: а – hydraulic cylinder, б – rocker arm

Висновки. Проведено перший етап динамічного дослідження важільних механізмів із внутрішньою урухомлювальною ланкою й отримано аналітичні залежності для обчислення кінематичних характеристик ланок. Показано, що на рухомі ланки модуля на початку і в кінці руху діє

раптово прикладене інерційне навантаження, що є небажаним. Тому з метою максимального зменшення стрибка пришвидшення в крайніх положеннях інших ланок механізму доцільно було б дослідити вплив зміни тиску в гідроциліндрі. Результати роботи можуть бути використані в до-

слідженнях руху ковшів екскаваторів з гідравлічним урухомником, в інших підйимально-навантажувальних і будівельно-дорожніх машинах, у виконавчих механізмах промислових роботів.

Бібліографічний список

1. Александров М. П. Подъемно-транспортные машины: учеб. для машиностроит. спец. вузов. 6-е изд., перераб. Москва: Высш. шк., 1985. 520 с.
2. Баловнев В. И., Зеленин А. Н., Керов И. П. Машины для земляных работ. Москва: Машиностроение, 1975. 422 с.
3. Деграве В. С. Особые положения плоских неассуровых структурных групп с внутренними входами. *Теория механизмов и машин*. 2006. Т. 4, № 2. URL: <http://tmm.spbstu.ru> (дата обращения: 15.09.2019).
4. Дроздова Л. Г., Курбатова О. А. Одноковшовые экскаваторы: конструкция, монтаж и ремонт: учеб. пособие. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. 235 с.
5. Зиновьев В. А. Курс теории механизмов и машин. Москва: Наука, 1975. 384 с.
6. Кіницький Я. Т. Теорія механізмів і машин: підручник. Київ: Наук. думка, 2002. 660 с.
7. Коловский М. З., Евграфов А. Н., Слоущ А. В., Семенов Ю. А. Теория механизмов и машин: учеб. для студентов учреждений высш. проф. образования. 4-е изд., испр. Москва: Академия, 2013. 560 с.
8. Кузьо І. В., Ванькович Т.-Н. М., Зінько Я. А. Теоретична механіка. Статика. Кінематика: посібник. Львів: Растр-7, 2010. 324 с.
9. Ловейкін В. С., Голдун В. А. Моделювання оптимальних режимів підйому та опускання вантажу. *Машинобудування*. 2014. № 14. С. 15–23.
10. Ловейкін В. С., Голдун В. А., Ромасевич Ю. О. Экспериментальные исследования динамики подъема и опускания вантажу за оптимальными законами. *Підйомно-транспортна техніка*. 2016. № 1. С. 21–31. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pidtt_2016_1_5 (дата звернення: 14.09.2019).
11. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О. Динамічна оптимізація механізму підйому вантажу мостових кранів: монографія. Київ: КОМПРИНТ, 2015. 197 с.
12. Мещеряков В. А. Адаптивное управление рабочими процессами землеройно-транспортных машин: дисс. ... д-ра техн. наук. Омск: СибАДИ, 2007. 304 с.
13. Павлов В. П. Методология автоматизированного проектирования рабочего оборудования одноковшовых экскаваторов: дисс. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 2011. 349 с.
14. Пасіка В. Р. Кінематика важільних механізмів з групами Ассура I і II видів. *Наукові записки*. Львів: УАД, 2001. Вип. 3. С. 12–16.
15. Пасіка В. Р. Кінематика важільних механізмів з групами Ассура III і V видів. *Поліграфія і видавничка справа*. 2001. № 37. С. 50–66.
16. Терентьева А. Д. Анализ точности перемещения рабочего органа одноковшового экскаватора. *Теория механизмов и машин*. 2016. Т. 14, № 4(32). URL: <http://tmm.spbstu.ru> (дата обращения: 15.09.2019).
17. Щербаков В. С. Научные основы повышения точности работ, выполняемых землеройно-транспортными машинами: дисс. ... д-ра техн. наук. Омск: СибАДИ, 2000. 416 с.
18. Щербаков В. С., Сухарев Р. Ю. Совершенствование системы управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора: монография. Омск: СибАДИ, 2011. 152 с.

Стаття надійшла 01.10.2019

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОГРАВІТАЦІЙНОГО РОЗДІЛЕННЯ ЗЕРНА

Степан Ковалишин, к. т. н., Олексій Швець, к. т. н.,
Віктор Дадак, к. т. н., Вадим Пташник, к. т. н.
Львівський національний аграрний університет,
бул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н,
Львівська обл., Україна,
e-mail: opshvets@yahoo.com

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.019>

Ковалишин С., Швець О., Дадак В., Пташник В. Дослідження процесу електрогравітаційного розділення зерна

Робота присвячена обґрунтуванню технологічних параметрів процесу електрогравітаційного розділення зерна.

У роботі наведено результати досліджень процесу електрогравітаційного сепарування зерна пшениці, ячменю та жита за допомогою камерного електрокоронного сепаратора, процес сепарування в якому здійснювався в горизонтальній площині на три фракції.

Оброблювані в процесі сепарування насіннєві суміші містили якісне зерно, щуплі, роздроблені та невимолочені зерна (відходи), частинки колосків і стебел, насіння бур'янів, інші домішки.

Ефективність сепарування оцінювали за допомогою визначення маси тисячі насінин кожної відсепарованої фракції, вмісту домішок у відсепарованому насінні та втрат основної культури у відходи. Регульованим параметром процесу була висока напруга електричного поля в міжелектродній зоні сепаратора.

У результаті досліджень встановлено, що максимальна маса тисячі насінин спостерігалась у фракції насіння з мінімальним кутом відхилення від вертикалі (приймач 1) за напруги на електродах у межах 15...20 кВ. Зменшення напруги призводить до зниження цього показника та збільшення домішок у відсепарованому зерні. Збільшення напруги на електродах понад 15 кВ призводить до зростання втрат основної культури у відходи.

У результаті досліджень було встановлено, що оптимальний режим роботи сепаратора під час сепарування насіння озимої пшениці досягається за напруги на коронувальному електроді $U = 14...15$ кВ; для насіння ячменю втрати й засміченість не перевищують норми за напруги на коронувальному електроді $U = 15$ кВ; оптимальний режим сепарування жита забезпечується за напруги на коронувальному електроді $U = 13...14$ кВ.

Ключові слова: електрогравітаційне розділення зерна, камерний електрокоронний сепаратор, критерій подільності, маса тисячі насінин, домішки, втрати, якість розділення.

Kovalyshyn S., Shvets O., Dadak V., Ptashnyk V. Research of electro-gravity separation of grain

The article is devoted to substantiation of technological parameters of the process of electrogravitational separation of grain. The results of studies of the process of electrogravitational separation of wheat, barley and rye grain with using a chamber electrocorona separator are presented in the article. The grain mix was separated in the horizontal plane into three fractions in the electrocorona separator.

The seed mixtures, subjected to separation process, contained high-quality grain, puny, crushed and threshed grains (wastes), parts of spikelets, stems and weed seeds, other impurities.

Separation efficiency was evaluated by determining the mass of thousands of seeds of each separated fraction, the content of impurities in the separated seeds, and the loss of the main crop to the waste. The high voltage of the electric field in the inter-electrode zone of the separator served as a regulated parameter of the process.

As a result of the studies, it has been found that the maximum mass of one thousand seeds is in the seed fraction in the 1 receiver (with a minimum of vertical deviation angle) at electrode voltages within 15...20 kV. The decrease in voltage leads to a decrease of this index and an increase in impurities in the separated grain. The voltage increasing up to 15 kV leads to an increased loss of the main crop to the waste.

Result of the researches demonstrate that the optimum mode of operation of the separator during the separation of winter wheat seeds is achieved at voltages at the corona electrode of $U = 14...15$ kV; for barley seeds the losses and clogging do not exceed the norm of the voltage at the corona electrode of $U = 15$ kV; optimum rye separation mode is ensured by the voltage at the corona electrode of $U = 13...14$ kV.

Key words: grain electrogravitational separation, chamber electrocorona separator, the criterion of division, the mass of a thousand of seeds, impurities, losses, quality of separation.

Постановка проблеми. Післязбиральна обробка зерна є одним із найбільш енергоємних етапів виробництва. Вона може передбачати первинну, вторинну, а за потреби й додаткову

очистки та підсушування зерна до регламентованої вологості [3; 4; 13; 15]. Основні енергозатрати припадають на роботу насіннеочисних машин. Крім того, вони зростають в рази під час

багаторазового пропускання насінневих сумішей через машину.

З метою зменшення вартості виробництва та затрат на експлуатацію техніки в сучасному виробництві необхідно використовувати енергоощадні машини і технології, а також створювати нові енергоощадні сепаратори.

До таких машин, на нашу думку, належать сепаратори, в яких як робочий орган використовується електричне поле коронного розряду. У них розділення зернової суміші здійснюється за сукупністю фізико-механічних та електричних властивостей компонентів [1; 3; 5; 7–12; 14; 19].

Найбільш енергоощадним видом таких сепараторів є камерний електрокоронний сепаратор. У ньому розділення відбувається під дією гравітаційної сили та сили дії електричного поля коронного розряду, а затрати електроенергії спрямовані саме на його створення. Ще однією перевагою такого сепаратора є відсутність рухомих вузлів і деталей, що також зменшує його енергоємність та механічні втрати.

Аналіз досліджень і публікацій. До машин, які дають змогу зреалізувати спосіб електрогравітаційного сепарування насіння, належить коронний електросепаратор камерного типу. Принципова схема його роботи зображена на рис. 1.

У ньому рух компонентів зернової суміші, які в міжелектродному просторі поля коронного

розряду отримали певний заряд, визначається в основному взаємодією сил електричного поля $F = Q \cdot E$ і сили тяжіння $P = m \cdot g$. Частинки суміші в міжелектродному просторі будуть падати вниз під дією сили P і змішуватися при цьому в бік осаджувального електрода під дією сили F [1; 5; 8; 16–18; 20] на деякий кут α .

За заданої величини та конфігурації електричного поля траєкторія різних частинок визначається тільки її властивостями, що й створює можливість поділу [1; 5; 6; 13]. Критерій подільності виражається як функція кута α :

$$k = \tan \alpha . \quad (1)$$

Оптимальний кут відхилення, за даними [1], повинен бути в межах

$$30^\circ < \alpha_{\text{опт}} < 45^\circ .$$

Слід, однак, мати на увазі, що під час проектування камерних сепараторів краще використовувати не різницю в кутах відхилення частинок, а поділ у вертикальній або горизонтальній площині [1; 5].

За вертикальною схемою сепарування (див. рис. 1) можна отримати достатню чіткість розподілу, але при цьому спостерігається відбивання частинок від поверхні осаджувального електрода, що знижує чіткість розділення. Крім того, конструктивно досить важко здійснити відбір і транспортування частинок, розділених у вертикальній площині.

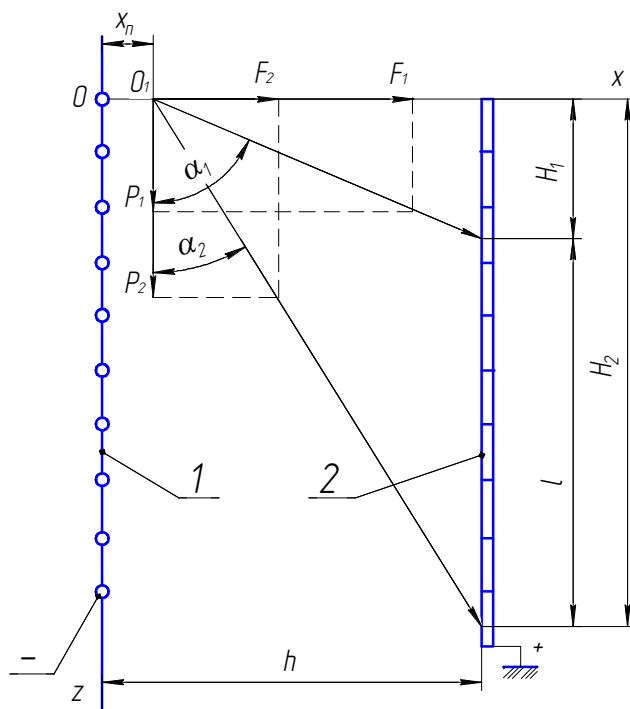


Рис. 1. Принципова схема камерного коронного сепаратора:

1 – коронувальний електрод; 2 – осаджувальний електрод; 0 – початкова координата; 0₁ – точка початку координат траєкторії частинки; x_n – початкова координата частинки; h – відстань між електродами; P₁ і P₂ – гравітаційні складові першої і наступної частинок; F₁ і F₂ – сили електричного поля, які діють на першу і наступну частинки; H₁ і H₂ – шлях, який пройшли частинки по вертикалі; l – відстань між частинками

Fig. 1. Schematic diagram of a chamber corona separator:

1 – corona electrode; 2 – receiving electrode; 0 – initial coordinate; 0₁ – the point of start of the coordinates of a particle trajectory; x_n – the initial coordinate of the particle; h – the distance between the electrodes; P₁ and P₂ – the gravitational components of the first and subsequent particles; F₁ and F₂ – the electric field force acting on the first and subsequent particles; H₁ and H₂ – the path that the particles passed vertically; l – the distance between the particles

При горизонтальній схемі сепарування чіткість розділення дещо менша, однак вплив відбивання мінімальний і продуктивність вища.

Постановка завдання. На сьогодні впровадження камерних електричних сепараторів у технологічні процеси обробки насіння гальмується недостатнім дослідженням їх роботи. Тому наше завдання – дослідити процес електрогравітаційного розділення зернових сумішей та обґрунтувати основні його технологічні параметри.

Виклад основного матеріалу. Для експериментальних досліджень процесу сепарування зерна в камерному електрокоронному сепараторі використовували насінні суміші озимої пшениці, ячменю та жита, в яких були наявні такі їх компоненти:

- якісне зерно;
- щупле зерно;
- бите зерно;

- частинки колоска;
- насіння бур'янів;
- невимолочені насінини;
- частинки стебла.

Характеристика насінневих сумішей наведена в табл. 1.

Вологість насіння під час проведення експериментальних досліджень становила 15 % для насіння пшениці та жита і 16,5 % для насіння ячменю.

Для проведення експериментальних досліджень було розроблено експериментальну установку, принципова схема якої наведена на рис. 2.

Величину електричного поля регулювали за рахунок зміни вхідної напруги живлення джерела високої напруги.

Під час досліджень значення високої напруги, яку подавали на коронувальний електрод, змінювалось у проміжку від 0 до 25 кВ з кроком 5 кВ.

Таблиця 1. Характеристика насінневих сумішей

Table 1. Characteristics of seed mixtures

Культура	Вміст домішок, %						Σ
	щупле зерно	бите зерно	частинки колоска	насіння бур'янів	невимолочені насінини	частинки стебла	
Пшениця	1,4	1,1	0,3	0,8	0,5	1,3	5,4
Ячмінь	1,3	0,9	0,5	1,7	0,6	1,2	6,2
Жито	1,5	1,3	0,4	0,5	0,8	1,1	5,6

Таблиця 2. Середнє значення маси 1000 насінин відсепарованих фракцій зерна

Table 2. Average weight of 1000 seeds of separated grain fractions

Напруга на коронувальному електроді, кВ	Маса 1000 насінин, г		
	Приймач 1	Приймач 2	Приймач 3
Озима пшениця			
5	33,33	-	-
10	37,63	32,17	20,60
15	38,90	33,90	23,33
20	39,10	34,83	25,33
25	39,27	36,93	28,33
Ячмінь			
5	31,77	-	11,50
10	34,70	30,53	17,30
15	37,90	32,63	22,03
20	38,80	33,97	26,17
25	38,83	36,73	29,77
Жито			
5	25,63	20,07	13,33
10	28,13	25,17	16,73
15	29,43	26,83	18,80
20	30,57	28,97	22,90
25	30,93	30,80	28,30

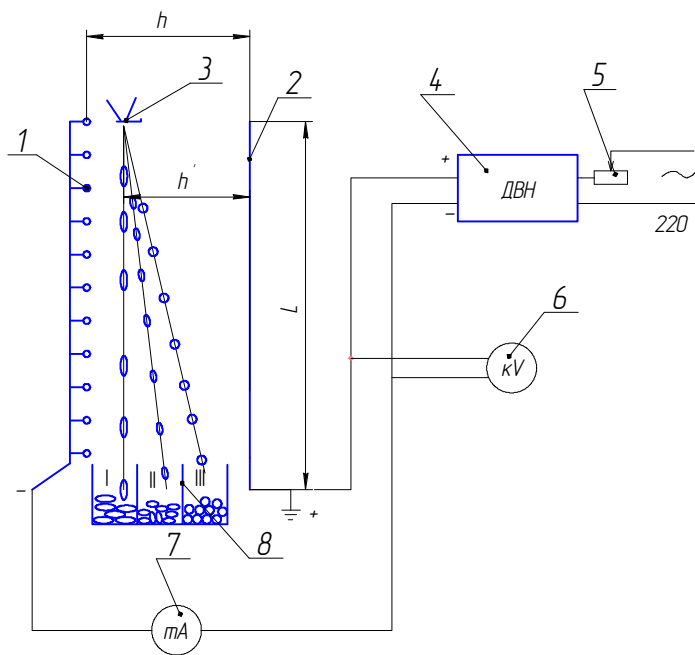


Рис. 2. Принципова схема експериментальної установки:

- 1 – коронувальний електрод;
- 2 – осаджувальний електрод з приймачами насіння; 3 – дозувальний пристрій;
- 4 – джерело високої напруги (ДВН);
- 5 – регулятор напруги живлення ДВН;
- 6 – кіловольтметр С-96; 7 – міліамперметр;
- 8 – приймачі насіння; h – міжелектродна відстань; L – висота сепарувального каналу

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup:

- 1 – corona electrode; 2 – receiving electrode with seed receivers; 3 – dosing device;
- 4 – high voltage source (HVS); 5 – regulator of a supply voltage of HVS;
- 6 – C-96 kilowatt-meter; 7 – milliammeter;
- 8 – seed receivers; h – distance between electrodes; L – the separation channel height

У результаті досліджень отримували три фракції насіння, в яких визначали вміст домішок та масу 1000 насінин фракції (m_{1000}), як одного зі стандартизованих показників якості насіння. За результатами вимірювання маси тисячі насінин кожної з фракцій робили висновок про ефективність сепарування та якість відсепарованого насіння.

Результати досліджень наведені у табл. 2 та на рис. 3–5.

Аналізуючи отримані результати досліджень, бачимо, що за мінімальних значень напруженості електричного поля в міжелектродному просторі сепаратора для насіння пшениці розділення на фракції не спостерігається. Для насіння ячменю за мінімального значення $U = 5$ кВ починають відділятися легкі домішки. Насіння жита також погано розділяється за таких умов.

Під час збільшення напруги на коронувальному електроді до максимального значення $U = 25$ кВ маса тисячі насінин фракцій насіння злаків у відповідних приймачах зростає. Однак у діапазоні $U = 20 \dots 25$ кВ різко зростає маса тисячі насінин у приймачі № 3. Це явище є небажаним, оскільки воно свідчить про потрапляння якісних насінин до фракції відходів з легкими домішками.

Зерно після обробки має відповідати за чистотою нормам обмежувальних або базисних кондицій. При цьому в обробленому матеріалі не повинно міститися більше ніж 3 % домішок [2].

З рис. 3 видно, що засміченість насіння досліджуваних культур не перевищує 3 % за напруги на

коронувальному електроді $U \geq 15$ кВ. За подальшого збільшення напруги в першому приймачі домішки відсутні повністю, однак більшість якісного насіння потрапляє в другий приймач.

Згідно з вимогами [2], які ставляться до насіннеочисних машин, допустимі втрати основного зерна у відходи не повинні перевищувати 1,5 %, а в смітєві домішки – 0,5 % від маси зерна основної культури у вихідному матеріалі.

Втрати основної культури у відходи визначали за допомогою визначення відсотка якісного насіння в третьому приймачі насіння. Результати визначення втрат основної культури у відходи за різних режимів сепарування ілюструє рис. 4.

Аналізуючи рис. 4–5, можна стверджувати, що для всіх досліджуваних насінневих сумішей зі збільшенням напруги понад 14 кВ починають зростати втрати якісних насінин основної культури у відходи (приймач 2) та сміття (приймач 3). За досягнення напруги 20 кВ втрати починають зростати на 1,5...3 %.

Оптимальні режими роботи сепаратора визначали за допомогою аналізу результатів експериментальних досліджень маси тисячі насінин фракцій насіння досліджуваних культур та втрат основної культури за різних значень напруги на коронувальному електроді.

У результаті аналізу визначали значення регульованих параметрів процесу сепарування, за яких функція відгуку маси тисячі насінин набувала максимуму, а функції засміченості насіння та функція втрат – мінімального значення:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= f(U) \Rightarrow \max \\ Y_2 &= f(U) \Rightarrow \max \\ Y_3 &= f(U) \Rightarrow \max \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де Y_1 – маса тисячі насінин; Y_2 – засміченість насіння; Y_3 – втрати основної культури.

Оптимальним вважалось таке значення регульованого параметра процесу сепарування, а саме напруги на коронувальному електроді, за якого вміст засмічувача не перевищував вимог стандарту, а втрати основної культури у відходи – агротехнічних вимог до сепараторів.

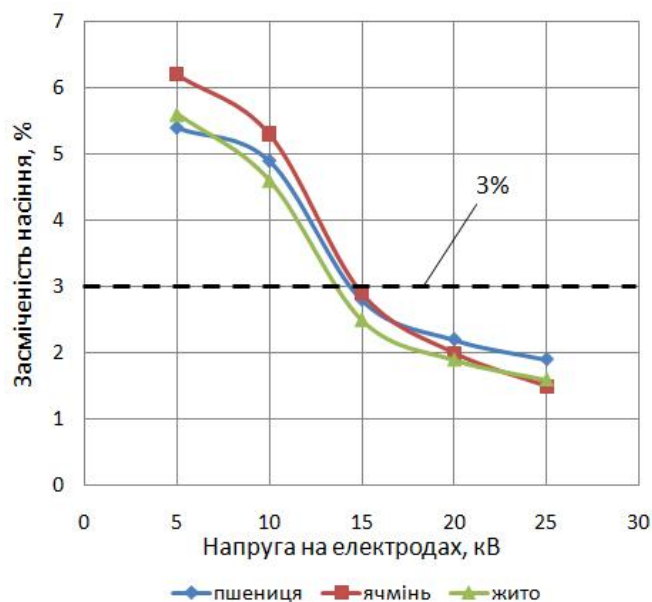


Рис. 3. Залежності засміченості насіння злаків за різних режимів сепарування

Fig. 3. Dependencies of the impurity content of cereal seeds under different modes of separation

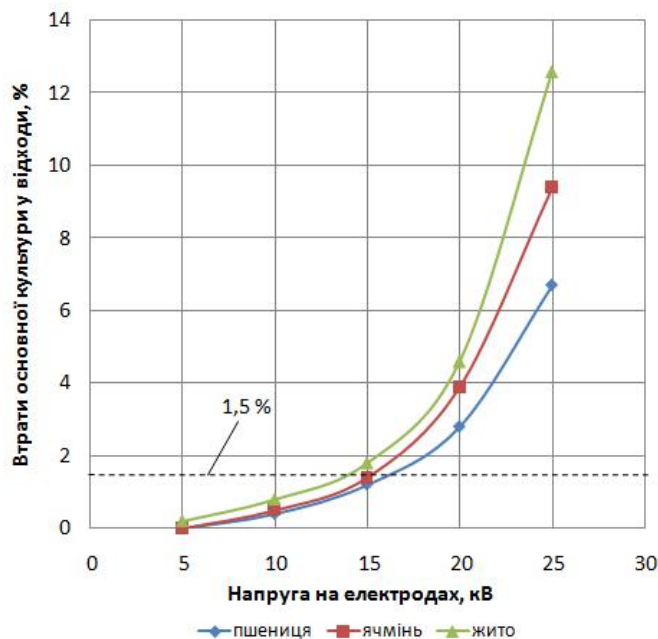


Рис. 4. Залежності втрат насіння основної культури у відходи (приймач 2)

Fig. 4. Dependence of loss of the main crop seed as waste (receiver 2)

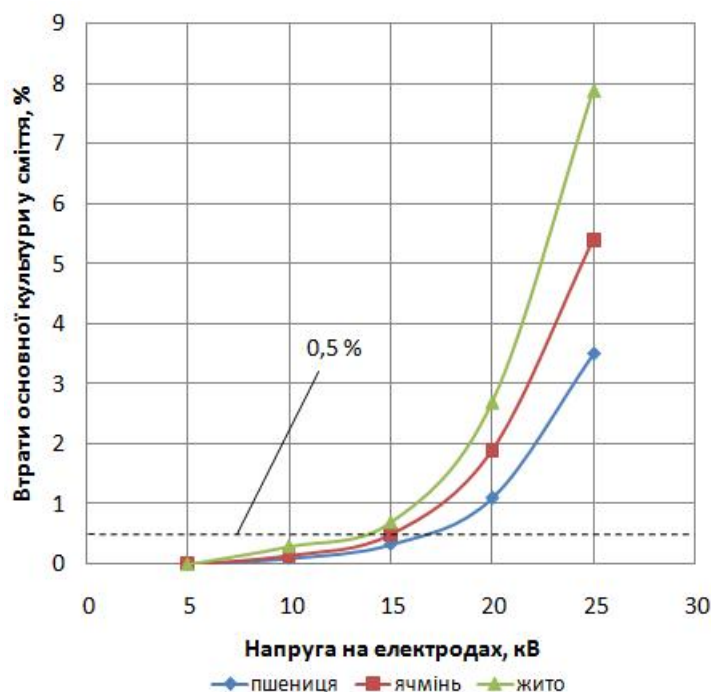


Рис. 5. Залежності втрат насіння основної культури у смітті (приймач 3)

Fig. 5. Dependence of loss of the main crop seed as refuse (receiver 3)

Аналізуючи табл. 2. та рис. 3–5, можна зробити висновок, що оптимальний режим роботи сепаратора під час сепарування насіння озимої пшениці досягається за напруги на коронувальному електроді $U = 14 \dots 15$ кВ; для насіння ячменю втрати й засміченість не перевищують норми за напруги на коронувальному електроді $U = 15$ кВ; оптимальний режим сепарування жита забезпечується за напруги на коронувальному електроді $U = 13 \dots 14$ кВ.

Висновки

1. Одним із найбільш енергоощадних методів сепарування зерна є електрогравітаційний метод, оскільки в ньому витрати електричної енергії спрямовані тільки на створення електричного поля коронного розряду.

2. Оптимальний режим роботи сепаратора досягається за напруги на коронувальному електроді:

- під час сепарування насіння озимої пшениці $U = 14 \dots 15$ кВ;
- під час сепарування насіння ячменю $U = 15$ кВ;
- під час сепарування насіння жита $U = 13 \dots 14$ кВ.

3. Зменшення напруги призводить до зниження маси тисячі насінин відсепарованого

насіння та збільшення в ньому сторонніх домішок (бите та щупле зерно, легкі домішки бур'янів тощо). Збільшення напруги понад 15 кВ призводить до зростання втрат основної культури у відходи та сміття.

4. Наступним етапом майбутніх досліджень повинно стати обґрунтування розмірів сепарувального каналу та приймачів продуктів сепарування.

Бібліографічний список

1. Басов А. М. Электрoзерноочистительные машины: теория, конструкции и расчёт. Москва: Машиностроение, 1968. 203 с.
2. ДСТУ 7160:2010. Насіння овочевих, баштанних, кормових і пряно-ароматичних культур, сортові та посівні якості. Технічні умови. [Чинний від 2010-07-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 16 с.
3. Ковалишин С. Й., Швець О. П. Застосування електричного поля коронного розряду під час передпосівної обробки насіння озимого ріпаку. *MOTROL Motoryzacja i energetyka rolnictwa*. 2011. № 13D. S. 276–283.
4. Ковалишин С. Й., Швець А. П. Результаты исследований процесса дополнительной очистки семян озимого рапса на электрофрикционном сепараторе. *Научные труды Русенского университета «Ангел Кънчев»*. Руссе, Болгария, 2012. 51. С. 56–60.
5. Паранюк В. О., Ковалишин С. Й., Швець О. П., Мельничук В. І. Фізичні основи технології сепарування

- насіння сільськогосподарських культур. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*: зб. наук. праць / УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого. Дослідницьке, 2007. Вип. 10 (24), кн. 1. С. 77–86.
6. Пристрій для обробки насіння: пат. 25302А Україна: МПК (2006) А01С 1/00. № 96051982; заявл. 21.05.1996; опубл. 25.12.1998, Бюл. № 6. 2 с.
7. Apparatus and Method for Triboelectrostatic Separation: United States of America Patent No. 5,938,041. 17.08.1999.
8. Berlage A. G., Bilsland D. M., Churchill D. B., Cooper T. M. Electrostatic separation to improve germination of carrot and celery seed. *Trans. ASAE*. 1990. 33(2). P. 597–600.
9. Dwari R. K., Hanumantha Rao K. Triboelectrostatic behaviour of high ashnon-coking Indian thermal coal. *Int. Miner. Process.* 2006. 81. P. 93–104.
10. Hemery Y., Holopainen U., Lampi A.-M. et al. Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients. Part 2: Electrostatic separation of particles. *Journal of Cereal Science*. 2011. 53. P. 9–18.
11. Hlavačova Z. Electrical properties of agricultural products. *Encyclopedia of Agrophysics* / eds.: J. Gliński, J. Horabik, J. Lipiec. Dordrecht-Heidelberg; London; New York: Springer Press, 2011.
12. Knoll F. S., Taylor J. B. Advances in Electrostatic Separation. SME Preprint, 1984. P. 84–71.
13. Kovalyshyn S., Dadak V., Konyk S. Intensification of the process of preparing small seed crop mixtures. Acta technologica agriculture. *The Scientific Journal for Agricultural Engineering*. 2015. 4. P. 108–112.
14. Kovalyshyn S., Shvets O., Grundas S., Tys J. Use of electro-separation method for improvement of the utility value of winter rapeseeds. *Int. J. Agrophysics*, 2013. 27. P. 419–424.
15. Kovalyshyn S., Shvets O. Study of efficiency of additional cleaning of rape seeds on the electrofrictional separator. VI International Scientific Congress a machinery. Vol. 1/3, June 2018. Proceedings. Vol. 1. Agricultural machines. Research and testing. New machine designs, 25.06 – 28.06. 2018. Burgas, Bulgaria, 2018. P. 13–15.
16. Manouchehri H. R., Hanumantha Rao K., Forsberg K. S. E. Review of electrical separation methods. Part 1: Fundamental aspects. *Miner. Metall. Process.* 2000. 17 (1). P. 23–36.
17. Manouchehri H. R., Hanumantha Rao K., Forsberg K. S. E. Review of electrical separation methods. Part 2: Practical consideration. *Miner. Metall. Process.* 2000. 17 (3). P. 139–166.
18. Mazumder M. K., Tennal K. B., Lindquist D. A. Triboelectric separation of coal from mineral impurities. *Electrostatic society of America 1995. Annual Meeting proceedings*. Laplacian press, Morgan Hill, CA, 1995. P. 59–70.
19. Messal S., Corondan R., Chetan I. et al. Electrostatic separator for micronized mixtures of metals and plastics originating from waste electric and electronic equipment. *Journal of Physics*. 2015. Vol. 646. P. 1–4.
20. Pandya T. S., Srinivasan R., Thompson C. P. Fiber Separation for Ground Corn Flour Using an Electrostatic Method. *Cereal Chemistry*. 2013. Vol. 90, No. 6. P. 535–539.

Стаття надійшла 25.09.2019

МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕНЕРГООЩАДНОГО ВІБРАЦІЙНОГО ДОЗАТОРА СИПКИХ КОРМІВ

Степан Хімка, к. т. н., Маркіян Гошко, к. т. н., Іван Дробот,
Валерій Сиротюк, к. т. н.

*Львівський національний аграрний університет,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н,
Львівська обл., Україна,
e-mail: stepanhimka@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.026>

Хімка С., Гошко М., Дробот І., Сиротюк В. Методика і результати експериментальних досліджень енергоощадного вібраційного дозатора сипких кормів

Огляд теорій дозування дав змогу запропонувати схему і конструкцію вібраційного дозатора, робочий орган якого виконаний у вигляді конуса, що встановлений у нижній частині живильного бункера, на стрижні. Робочий орган у статичному режимі перекидає вихідну горловину і запобігає вільному витіканню корму. Під час урухомлення робочого органа за допомогою електромагнітного вібратора і постійного магніту подача буде здійснюватися за рахунок зміни фізико-механічних властивостей, а саме за рахунок зменшення коефіцієнта внутрішнього тертя.

Метою досліджень є підтвердження адекватності результатів теоретичних досліджень порівнянням параметрів коливань, отриманих теоретичним способом.

Для проведення досліджень вібраційного дискового дозатора ми розробили експериментальну установку, на якій передбачено наявність засобів регулювання, вимірювання, реєстрації, передачі, обробки та зберігання інформації. Установка охоплює апаратну складову і програмне забезпечення.

Вірогідність результатів теоретичних досліджень, зокрема подачі дозатора, порівнювали з експериментально отриманою подачею зі заданими значеннями параметрів і режимів роботи, відхилення експериментально отриманих значень подачі від теоретичних не перевищують вимог, допустимих на точність дозування.

Визначено вагомості факторів, що впливають на подачу дозатора, з використанням методики відсівного експерименту. З діаграми рівня значущості факторів, виділених методом випадкового балансу за критерієм Стьюдента, видно, що фактори x_1 , x_2 та x_4 (відповідно круговий зазор, утворений горловиною бункера і робочим органом, амплітуда коливань і кут внутрішнього тертя корму) є значущими з 95 %-вою вірогідністю. Вплив решти факторів малозначущий.

Рівняння регресії в розкодованому вигляді дозволяє розрахунковим способом налаштувати подачу дозування комбікормів вібраційним дозатором за вибору значень розглянутих факторів, які лежать в області експерименту.

На основі рівняння регресії побудовано поверхні відгуку залежності, близькі до лінійних, з яких видно, що за збільшення факторів збільшується подача і навпаки.

Ключові слова: вібраційний дозатор, критерії оптимізації, фактор, подача, діаграма розсіяння результатів.

Khimka S., Hoshko M., Drobot I., Sirotiuk V. Methods and results of experimental research on energy saving fluid feeder

Having reviewed the theories of dosage, the authors of the research propose a scheme and design of a vibrating dispenser with the working body, which is made in the form of a cone, mounted in the lower part of the feed hopper, on the rods. In the static mode, the working body closes the output neck and prevents the free flow of feed. During the collapse of the working body with the help of an electromagnetic vibrator and a permanent magnet, the feed will be made by changing the physical and mechanical properties, namely by reducing the coefficient of internal friction.

The purpose of the research is to confirm the adequacy of the results of theoretical studies by comparing the oscillation parameters, obtained in a theoretical way.

For the research of the vibrating disk dispenser, we have developed an experimental facility, which provides for the means of regulation, measurement, registration, transmission, processing and storage of information. The installation covers the hardware component and the software.

The reliability of the results of theoretical studies, in particular the feeder dosage, was compared to the experimentally obtained feed with the set values of parameters and modes of operation. Deviations of the experimentally obtained feed values from the theoretical do not exceed the requirements of the permissible dosage accuracy.

The weights of the factors, influencing the feed of the dispenser, were determined using the screening experiment technique. The chart of significance of the level of the factors, selected by the Student's random balance method, demonstrates that the factors x_1 , x_2 and x_4 (the circular gap formed by the hopper neck and the working body, the oscillation amplitude, and the internal friction angle of the feed respectively) are significant with 95 % probability. The impact of the other factors is insignificant.

The regression equation in its decoded form supplies use of the calculated method to adjust the feed dosage of the compound feed with a vibrating dispenser by selecting the values of the considered factors that lie within the area of the experiment.

Basing on the regression equation, the response surfaces of the dependences are close to linear ones, which show that increase of the factors causes increase of the feed, and vice versa.

Key words: vibration dispenser, optimization criteria, factor, flow, scatterplot.

Постановка проблеми. Огляд теорій дозування [1–5; 7; 8; 16–18], проведений нами, дав змогу запропонувати схему і конструкцію вібраційного дозатора, робочий орган якого виконаний у вигляді конуса, що встановлений у нижній частині живильного бункера, на стрижні. Робочий орган у статичному режимі перекидає вихідну горловину і запобігає вільному витіканню корму [11]. Під час урухомлення робочого органа за допомогою електромагнітного вібратора і постійного магніту подача здійснюватиметься за рахунок зміни фізико-механічних властивостей, а саме за рахунок зменшення коефіцієнта внутрішнього тертя [14].

Потрібно провести експериментальне дослідження, яке є критерієм істинності, перевірити працездатність і межі стійкості роботи системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У статті [14] наведено спосіб теоретичного визначення подачі вібраційного дозатора з крутильними коливаннями робочого органа. У працях [12; 13] наведено методику й апаратні засоби для експериментальних досліджень режимів роботи енергоощадного вібраційного дозатора сипких кормів. Але в літературі ми не знаходимо результатів експериментальних досліджень вібраційних дозаторів із крутильними коливаннями робочих органів.

Постановка завдання. Показати методику і результати досліджень та визначити вагомість факторів методом відсівного експерименту і їх вплив на подачу дозатора на підставі багатфакторного планованого експерименту.

Виклад основного матеріалу. Для проведення досліджень вібраційного дискового дозатора зроблено експериментальну установку, на якій передбачено наявність засобів регулювання, вимірювання, реєстрації, передачі, обробки та зберігання інформації (рис. 1). Установка охоплює апаратну складову частину і програмне забезпечення.

Апаратна частина (рис. 2, 3) експериментальної установки виконана таким чином, що забезпечує керовану зміну жорсткості стрижня-торсіона, моменту інерції рухомої частини, зазору між робочим органом і горловиною бункера, амплітуду й частоту вимушених коливань.

Жорсткість стрижня регулюємо зміною його довжини. Момент інерції рухомої частини змінюємо за допомогою заміни диска або заміною основи диска різної товщини [13].

Кріплення бункера дозволяє регулювати зазор між робочим органом, який жорстко закріплений на нижньому кінці стрижня, і вихідною горловиною бункера.

Рис. 1. Схема дослідної установки:

- 1 – бункер; 2 – стрижень;
- 3 – кругова телескопічна заслінка; 4 – робочий орган;
- 5 – циліндрична частина робочого органа;
- 6 – генератор сигналів; 7 – підсилювач потужності вихідного сигналу; 8 – пристрій для збудження (електромагніт); 9 – плата входу/виходу USB 6008; 10 – ЕОМ; 11 – показчик амплітуди (лазерна указка і лінійка); 12 – давач витрати (місток із тензодавачів на гнучкій ресорі); 13 – електронна вага

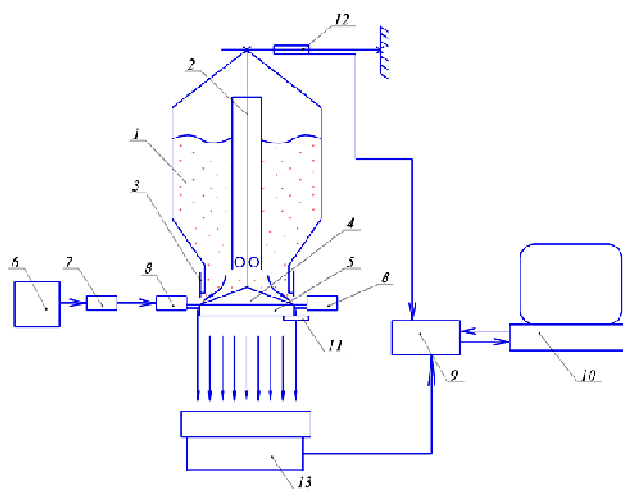


Fig. 1. Scheme of the experimental setup: 1 – bunker; 2 – rod; 3 – circular telescopic shutter; 4 – working body; 5 – cylinder part of the working body; 6 – signal generator; 7 – power amplifier of the output signal; 8 – device for excitation (electromagnet); 9 – board I/O USB 6008; 10 – computer; 11 – amplitude pointer (laser pointer and ruler); 12 – flow gauge (bridge of strain gages on flexible spring); 13 – electronic weight

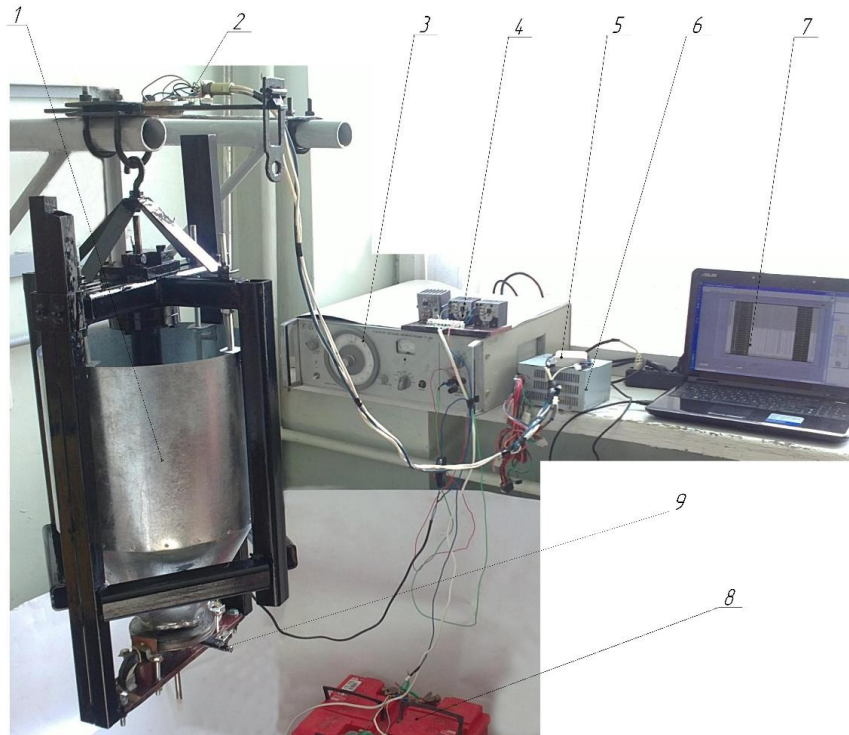


Рис. 2. Дослідна установка: 1 – дозатор; 2 – тензометричний давач подачі;
3 – генератор сигналів; 4 – плата підсилення сигналу; 5 – блок вводу/виводу інформації USB 6008;
6 – блок живлення; 7 – ПК; 8 – акумуляторна батарея;
9 – лазерний пристрій відображення амплітуди коливань

Fig. 2. Experimental installation: 1 – dispenser; 2 – strain gauge feeder;
3 – signal generator; 4 – signal amplification board; 5 – I / O circuit board USB 6008;
6 – power supply; 7 – PC; 8 – the rechargeable battery;
9 – laser device for displaying the amplitude of oscillations

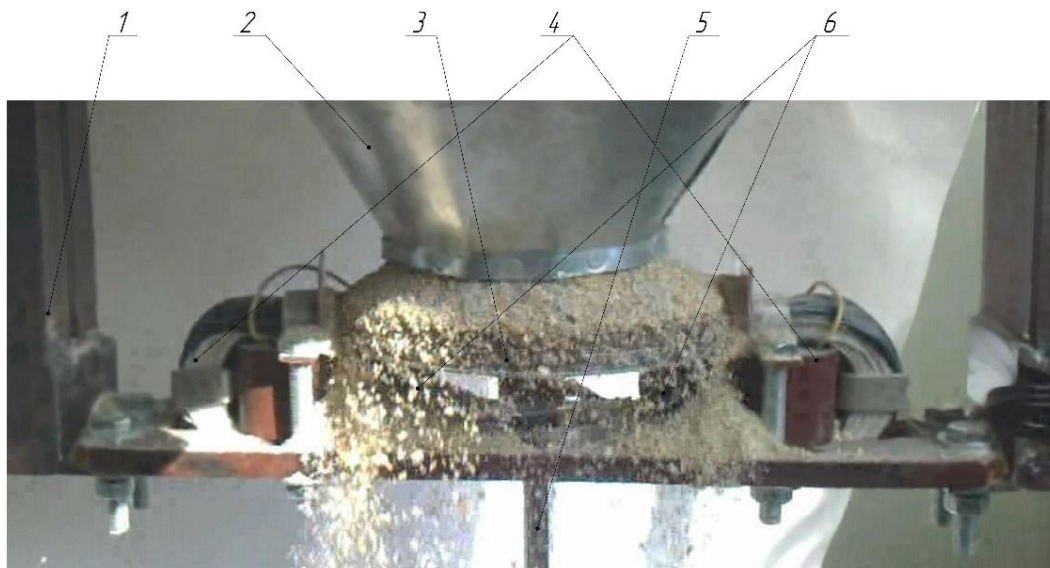


Рис. 3. Елементи робочої частини дозатора:
1 – рама; 2 – бункер; 3 – робочий орган; 4 – електромагніти; 5 – стрижень; 6 – постійні магніти

Fig. 3. Elements of the working part of the dispenser: 1 – frame; 2 – hopper;
3 – working body; 4 – electromagnets; 5 – core; 6 – permanent magnets.

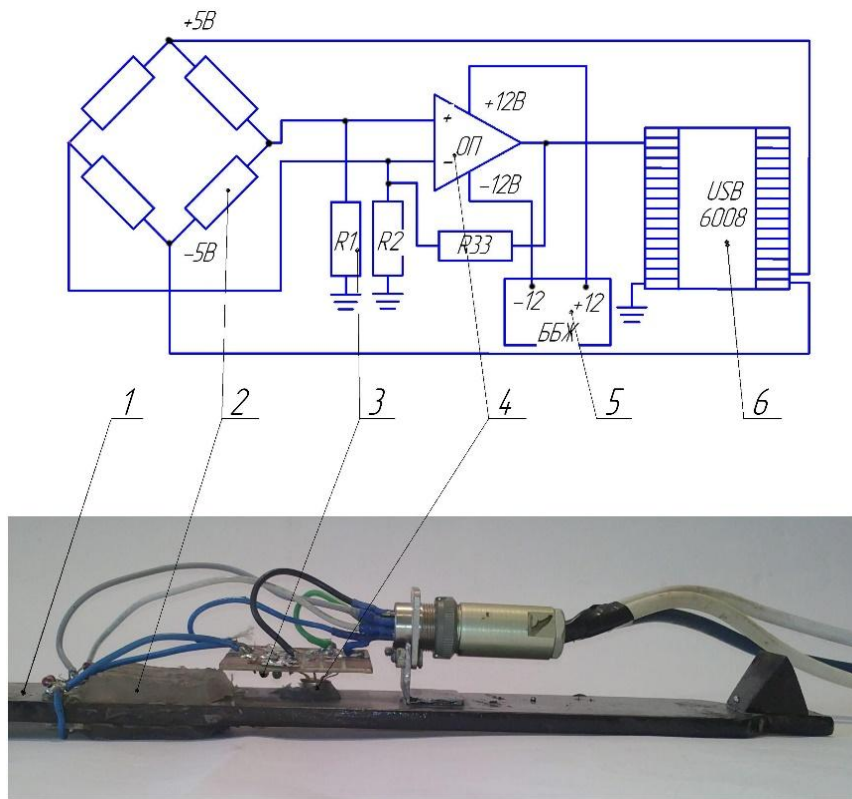


Рис. 4. Елементи давача подачі: 1 – пружний елемент; 2 – тензометричний давач; 3 – резистори зворотного зв’язку; 4 – операційний підсилювач; 5 – джерело живлення; 6 – блок вводу/виводу USB 6008

Fig. 4. Elements of sensor supply: 1 – elastic element; 2 – strain gauge; 3 – feedback resistors; 4 – operational amplifier; 5 – power supply; 6 – board I / O USB 6008

Також на робочому диску встановлений «давач амплітуди», який складається з лазерної указки та лінійки. Подачу дозатора і рівномірність вимірювали за допомогою давача витрати, який складається з тензодавачів, що закріплені на гнучкій ресорі за мостовою схемою з обох боків ресори (зверху і знизу), і зі збільшенням витрати деформація ресори зменшується, зменшується й деформація тензодавачів, які через підсилювач подають сигнал на плату вводу/виводу USB 6008 [15; 19]. Контрольні заміри подачі проводили за допомогою електронної ваги.

Рівномірність і подачу дозатора вимірюємо за допомогою давача витрати (рис. 4), який являє собою місток з тензодавачів, наклеєний на гнучкій ресорі [6; 9; 10; 20].

Подача дозатора виражається у вигляді [14]:

$$Q = \frac{1}{2} g(\sin\varphi_i - \cos\varphi_i \cdot \operatorname{tg}\varphi_i) \cdot \sqrt{\frac{2(R_p - R_z)}{g(\sin\varphi_i - \cos\varphi_i \cdot \operatorname{tg}\varphi_i) \cdot \cos\varphi_i}} \times 2\pi R_z \cdot (R_p - R_z) \cdot (\operatorname{tg}\varphi_0 - \operatorname{tg}\varphi_i) \cdot \rho \cdot \cos\varphi_i. \quad (1)$$

де R_p – радіус основи, м; φ_0 – статичний кут природного відкошу сипкого корму, рад; φ_i – біжуче значення кута площини зсуву, рад; h_3 – висота кільцевого зазору, м; φ_i – кут внутрішнього тертя корму, псевдорозрідженого вібрацією, рад; ρ – густина сипкого матеріалу, кг/м^3 .

Вірогідність результатів теоретичних досліджень, зокрема подачі дозатора, визначеної за формулою (1), порівнювали з експериментально отриманою подачею зі заданими значеннями параметрів і режимів роботи на рис. 5 [17].

Першим етапом експериментальних досліджень було визначення вагомості факторів, що впливають на подачу дозатора, з використанням методики відсівного експерименту [17]. Перед тим як побудувати матрицю відсівного експерименту, здійснено вибір факторів та їх рівнів варіювання і проведено кодування знаками (+) і (-) (див. табл. 1), а критерій оптимізації – подача дозатора.

Значення критерію оптимізації, одержане на основі усереднення результатів триразової повторності проведених досліджень, наведено у табл. 2 згідно з розробленою матрицею відсівного експерименту (рис. 6).

На рис. 7 зображена діаграма ефектів, виділених методом випадкового балансу за визначення впливу факторів на процес дозування. Ця діаграма дає наглядне уявлення про ступінь впливу кожного з п'яти факторів та дозволяє виділити з них найвпливовіші.

Значущість виділених факторів за t -критерієм подано у вигляді діаграми на рис. 8.

З діаграми рівня значущості факторів, виділених методом випадкового балансу за критерієм Стюдента, видно, що фактори x_1 , x_2 та x_4 (відповідно круговий зазор, утворений горловиною бункера і робочим органом, амплітуда коливань і кут внутрішнього тертя корму) є значущими з 95 %-вою вірогідністю. Вплив решти факторів є малозначущим.

Для визначення взаємозв'язку між факторами та критерієм оптимізації проведено повний трифакторний планований експеримент на трьох рівнях типу 3^k . Результати кодування занесено в табл. 3.

Таблиця 1. Фактори, що впливають на критерій оптимізації дозатора

Table 1. Factors that affect the optimization criterion of the doser

Фактор та його позначення	Рівень факторів	
	-1	+1
x_1 – круговий зазор h , м	0,008	0,012
x_2 – амплітуда коливань A , град	$0^\circ 40'$	$3^\circ 22'$
x_3 – кут нахилу диска, град	10	20
x_4 – кут природного відкосу α , град	51	49
x_5 – висота корму в бункері, м	0,2	0,6

Таблиця 2. Матриця відсівного експерименту зі значенням критерію оптимізації

Table 2. Matrix of sifting out experiment with the value of the optimization criterion

№ досліджу	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Значення критерію оптимізації y , кг/с	Значення критерію оптимізації після коректування y' , кг/с
1	-	-	-	-	+	0,0125	0,0125
2	+	+	-	+	-	0,1182	0,0192
3	+	-	+	+	-	0,0240	-0,008
4	-	+	+	-	-	0,0602	-0,0068
5	-	-	-	+	-	0,0145	0,0145
6	+	-	+	-	+	0,0260	-0,006
7	+	+	-	-	+	0,1080	0,009

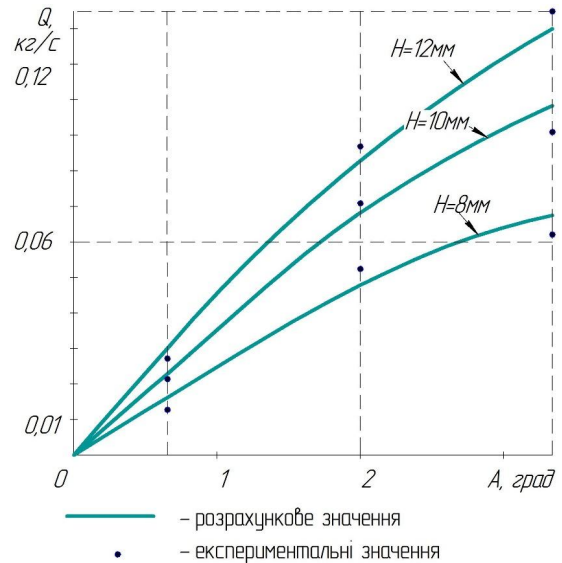


Рис. 5. Графік порівняння розрахункової та експериментальної подачі залежно від амплітуди коливань: H – круговий зазор між горловиною і робочим органом

Fig. 5. Graph of the comparison of calculated and experimental feed, depending on the amplitude of oscillations: H – circular gap between the neck and the working body

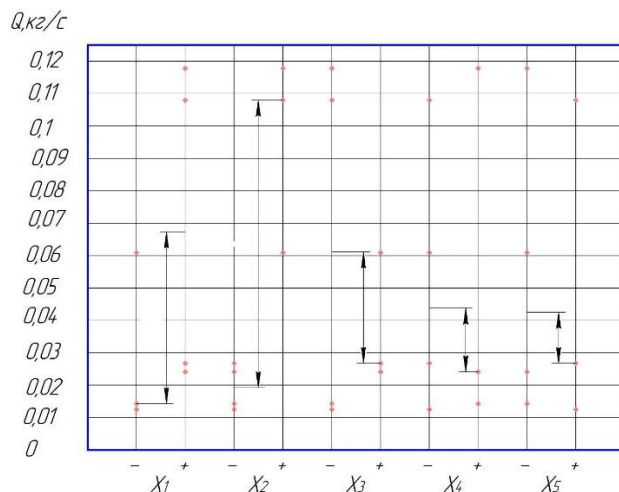


Рис. 6. Діаграма розсіювання результатів спостережень за рівнями факторів

Fig. 6. Diagram of dispersion of the results of observations of the levels of factors

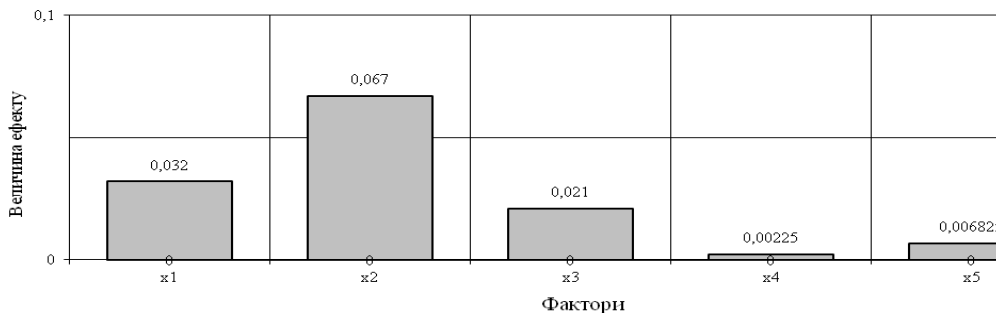


Рис. 7. Діаграма ефектів, виділених методом випадкового балансу під час визначення впливу факторів

Fig. 7. Diagram of effects of randomly selected balance while determining the factors' impact

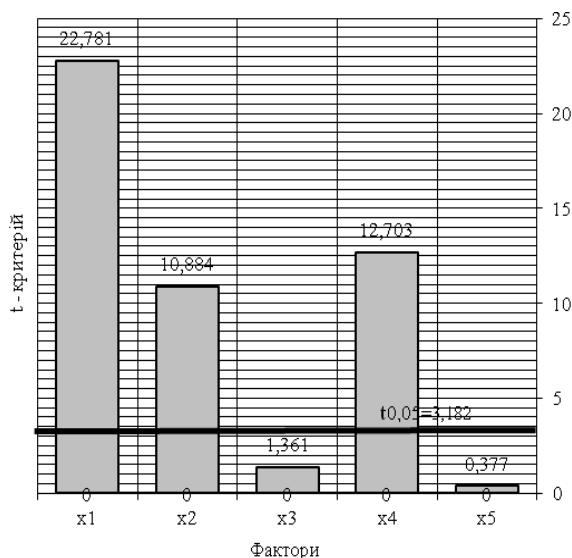


Рис. 8. Діаграма рівня значущості факторів, виділених методом випадкового балансу за критерієм Стьюдента

Fig. 8. Diagram of significance of the factors, selected by random balance by the Student's criterion

Таблиця 3. Межі зміни факторів та їх значення**Table 3.** Limits of change of the factors and their values

Фактор	Рівень факторів			Інтервал E
	нижній	нульовий	верхній	
	-	0	+	
x_1 – круговий зазор h , м	0,08	0,1	0,12	0,02
x_2 – амплітуда коливань A , град	0°40'	2°00'	3°20'	1°20'
x_3 – кут природного відкосу α , град	51	50	49	1

Провівши експеримент і отримавши дослідні дані, перевірили їх на відтворюваність. У результаті отримали рівняння

$$Y = 0,067 + 0,0169x_1 + 0,3466x_2 + 0,00063x_3 + 0,0185x_1x_2 + 0,00046x_1x_3 + 0,0003x_2x_3 - 0,00003x_1^2 - 0,0126x_2^2 - 0,004x_3^2. \quad (2)$$

Аналіз рівняння (2) дає підстави стверджувати, що на продуктивність найбільший вплив мають круговий зазор та амплітуда коливань. Нами було здійснено перевірку на адекватність рівнянь регресії за критерієм Фішера.

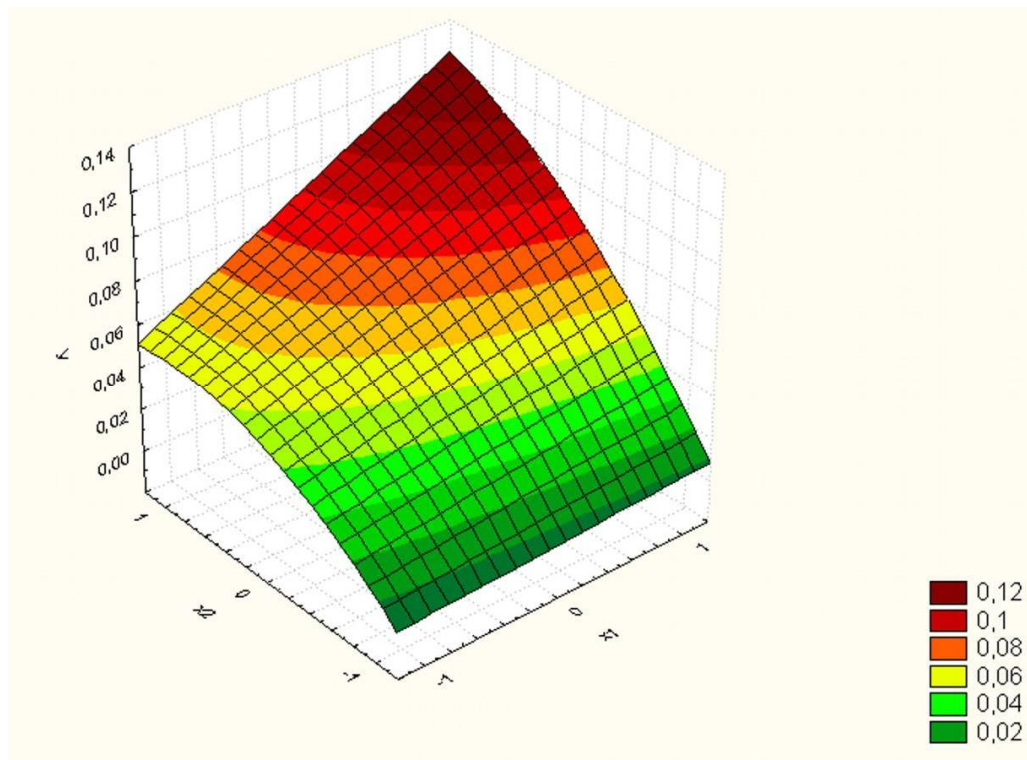
Згідно з рівнянням регресії половина коефіцієнтів є значущими, а решта малозначущими. У такому разі можна перейти від кодованих значень факторів x_1 , x_2 і x_3 до їх натуральних значень:

$$Y = -4,96 - 1,24x_1 + 0,19x_2 + 0,66x_1x_2 - 0,0064x_2^2. \quad (3)$$

На основі рівняння (2) побудовано поверхні відгуку. Під час побудови поверхонь відгуку змінювались тільки два фактори, а третій залишався рівним нулю. Для цього нами використано програмне забезпечення Statistica 10.0.

Висновки. Як свідчать результати, наведені на рис. 5 відхилення експериментально отриманих значень подачі від теоретичних не перевищують вимог, допустимих на точність дозування.

Як видно з рис. 9 – 11, залежності близькі до лінійних, за збільшення факторів збільшується подача і навпаки.

**Рис. 9.** Поверхні відгуку $Q = f(h, A)$ **Fig. 9.** The response surfaces $Q = f(h, A)$

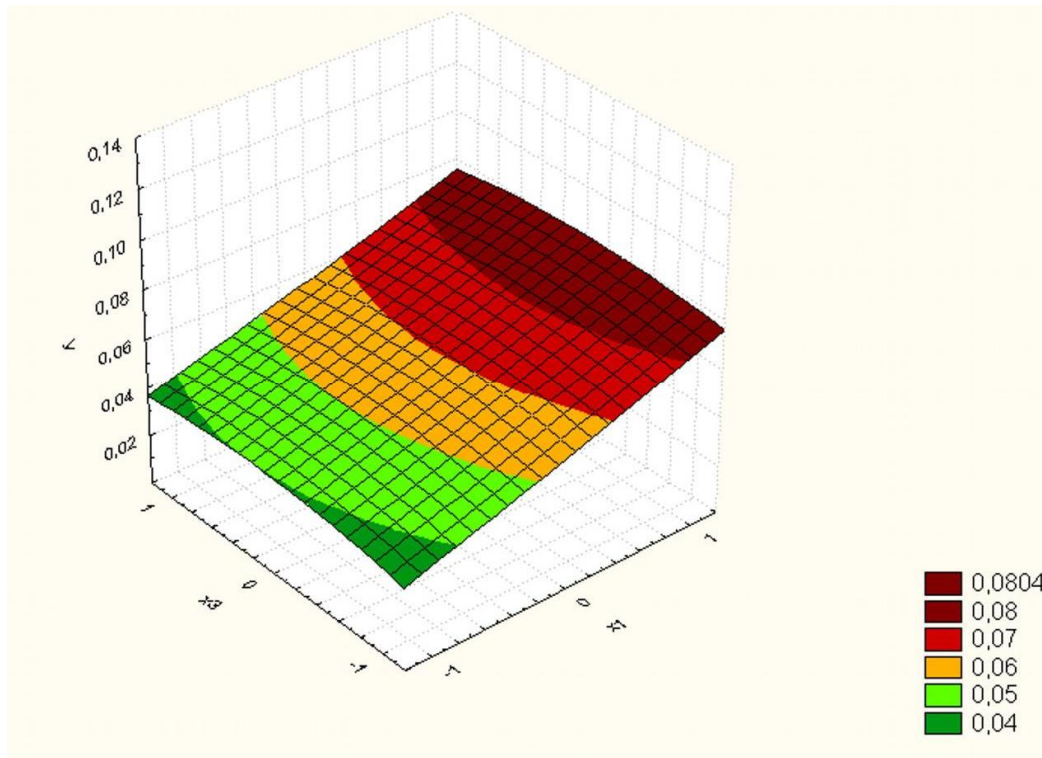


Рис. 10. Поверхні відгуку $Q = f(h, \alpha)$

Fig. 10. The response surfaces $Q = f(h, \alpha)$

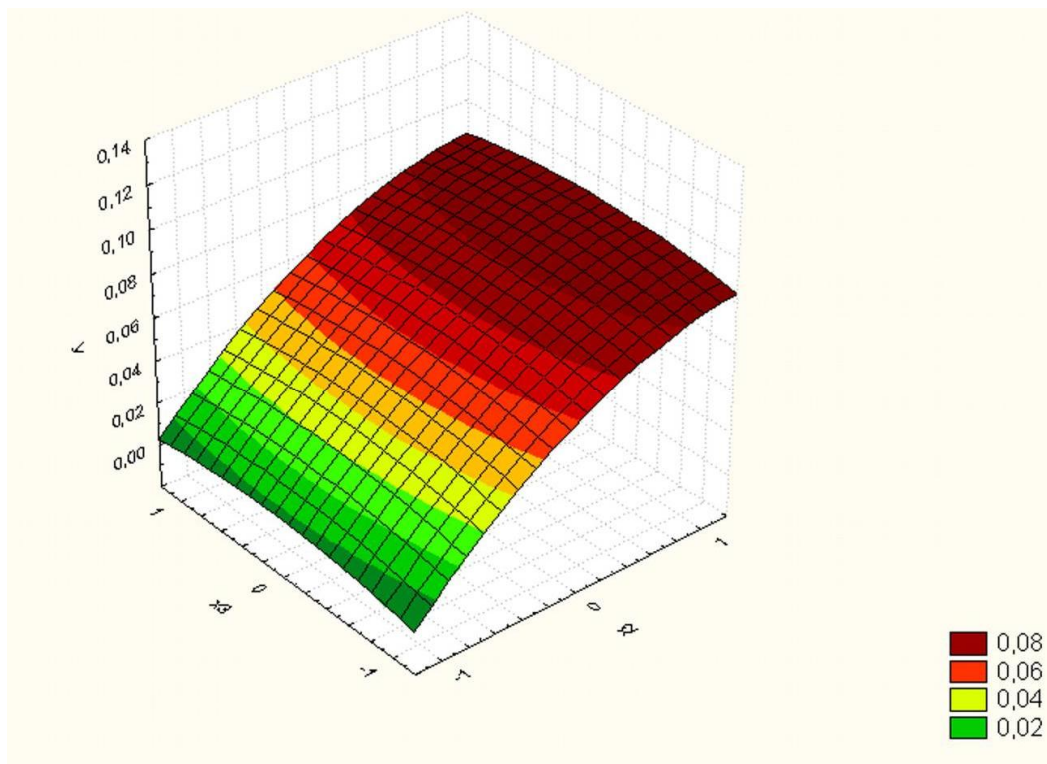


Рис. 11. Поверхні відгуку $Q = f(A, \alpha)$

Fig. 11. The response surfaces $Q = f(A, \alpha)$

Рівняння регресії (2) у розкдованому вигляді дає змогу визначити розрахунковим способом подачу дозування комбікормів вібраційним дозатором при виборі значень розглянутих факторів, які лежать в області експерименту. Область експерименту вибрана на підставі початкових дослідів, з яких визначали, що при зазорі, меншому від 2 мм, і амплітуді, що менша 40°, подача майже припиняється, при круговому зазорі близько 14 мм починається самовитікання корму.

Бібліографічний список

1. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування / О. В. Барало, П. Г. Самойленко, С. Є. Гранат, В. О. Ковальов. Київ: Аграрна освіта, 2010. 557 с.
2. Алешкин В. Р., Роцин П. М. Механизация животноводства. Москва: Агропромиздат, 1985. 334 с.
3. Артюшин А. А., Черкун В. Я. Методика регистрации и оценки расхода материалов при испытании машин. *Новое в методах испытаний тракторов и сельскохозяйственных машин*. Москва: ЦНИИТЭИ, 1976. Вып. 19. С. 137–145.
4. Бойко І. Г., Щур Т. Г. Аналіз конструкції дозаторів сипучих кормів і основний напрямок їх удосконалення. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. 2004. Вип. 29. С. 347–350.
5. Бойко І. Г., Щур Т. Г. Обгрунтування напрямків удосконалення конструктивних рішень дозаторів мікроелементів. *Збірник наукових праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого*. Дослідницьке, 2005. Вип. 8. С. 138–142.
6. Василега П. О., Муріков Д. В. Электропривод рабочих машин: навч. посіб. Суми: ВТД «Університетська книга», 2006. 228 с.
7. Вібраційний дисковий дозатор сипучих матеріалів: пат. 3957U UA 7A01K 5/02. Україна. № 200404261; заявл. 06.04.2004; опубл. 15.12.2004, Бюл. № 12.
8. Дозатор сипучих кормів: пат. 52059A UA 6A01K 5/02. № 2002010755; заявл. 30.01.02; опубл. 16.12.02, Бюл. № 12.
9. Иванов И. И., Лукин А. Ф., Соловьев Г. И. Электротехника. Основные положения, примеры и задачи. Санкт-Петербург: Лань, 2002. 192 с.
10. Мочернюк Ю. П., Голодняк Р. І., Хім-ка С. М. Квазібаланс потужностей в електричному колі із зосередженими параметрами періодичного несинусоїдального струму. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2011. № 15. С. 442–445.
11. Сиротюк В. М., Дробот І. М., Хім-ка С. М. Обгрунтування параметрів вібраційного конусно-дискового дозатора комбікормів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Механізація сільського виробництва*. 2010. Вип. 93, т. 1. С. 458–463.
12. Сиротюк В. М., Сиротюк С. В., Хім-ка С. М. Методика і апаратне забезпечення досліджень параметрів вібраційного дозатора сипучих кормів. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2009. № 13, т. 1. С. 196–202.
13. Сиротюк В. М., Хім-ка С. М. Експериментальне дослідження режимів роботи енергоощадного вібраційного дозатора сипучих кормів. *MOTROL Motoryzacja i energetyka rolnictwa*. 2011. № 13D. S. 62–67.
14. Сиротюк В. М., Хім-ка С. М., Василів К. М. Теоретичне визначення подачі вібраційного енергоощадного дозатора сипучих кормів. *MOTROL Motoryzacja i energetyka rolnictwa*. 2012. № 14. S. 106–109.
15. Сиротюк В. М., Хім-ка С. М., Сиротюк С. В. Віртуальні контрольні-вимірні прилади і системи: навч. посіб. Львів: Магнолія–2006, 2017. 128 с.
16. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле: пер. с англ. Москва: Машиностроение, 1985. 472 с.
17. Хім-ка С. М. Обгрунтування параметрів вібраційного дозатора сипучих кормів: дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2012. 151 с.
18. Щур Т. Г. Теоретичне дослідження рівноваги і руху сипучого матеріалу в бункерах з круглими отворами. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2007. Вип. 59, т. 1. С. 307–316.
19. Khimka S., Sosnowski S. Control lighting by means of virtual control measurement device. *MOTROL Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2016. Vol. 18, No. 8. P. 85–89.
20. Yatsun A. M. Power of consumption and phase displacement between voltage and a current of the covering ring capacitor transducer over a conducting plate. *MOTROL Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2013. Vol. 15, No. 4. P. 206–211.

Стаття надійшла 25.09.2019

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ЛАНЦЮГОВО-ПЛУНЖЕРНОГО САДИЛЬНОГО АПАРАТА ЗУБКІВ ЧАСНИКУ

Ярослав Семен¹, к. т. н., Лариса Кузенко², к. т. н., Олег Семен¹

¹Львівський національний аграрний університет,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н,
Львівська обл., Україна,
e-mail: jsemen@ukr.net

²Львівський центр професійно-технічної освіти державної
служби зайнятості,
вул. Княгині Ольги, 122, м. Львів, Україна,
e-mail: kuzenko.lm@gmail.com

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.035>

Семен Я., Кузенко Л., Семен О. Дослідження кінематики ланцюгово-плунжерного садильного апарата зубків часнику

У статті подано результати наукових досліджень проблем механізованого садіння часнику і, зокрема, обґрунтування конструкції саджалки. Для умов технологічного процесу садіння зубків часнику з примусовим поштучним їх укладанням у клиноподібну борозенку денцем донизу, а ростком вгору теоретично досліджено взаємодію ролика штока вилки ланцюгово-плунжерного апарата з напрямною, яка має форму дуги кола певного радіуса.

Розглянуто взаємодію ролика, закріпленого на штоці плунжера з напрямною, окресленою по дузі параболи, під час заглиблення вилки з зубком часнику в ґрунт. Встановлено, що для запобігання заклинюванню й усунення надмірного зношування поверхонь, які контактують, у початковий момент взаємодії ролика з напрямною нормаль до неї має проходити вздовж штока вилки. Така умова є обов'язковою незалежно від профілю самої напрямної, яка може мати вигляд дуги кола відповідного радіуса або бути окресленою по дузі параболи.

Дослідженнями підтверджено, що основними кінематичними показниками взаємодії досліджуваних елементів садильного апарата є переміщення, швидкість і прискорення вилки в момент її встромляння разом із зубком часнику в ґрунт.

Отримано теоретичні залежності для визначення основних кінематичних показників характеризованого процесу, які розв'язані числовим методом Рунге – Кутта з наступним графічним відображенням отриманих закономірностей. Виконано порівняльну оцінку взаємодії ролика, закріпленого на штоці плунжера, з поверхнями напрямних різних профілів. Встановлено, що, незалежно від форм поверхонь досліджуваних напрямних, переміщення вилки в часі взаємодії ролика штока ланцюгово-плунжерного садильного апарата з ними описуються теоретичними кривими, що мають поліноміальну закономірність.

Досліджено, що зміна швидкості руху вилки у вертикальному напрямку під час взаємодії ролика з напрямною у вигляді дуги кола має прямо пропорційну залежність від часу їх контакту. Для напрямної у вигляді параболи зміна швидкості вилки в часі відображається графічно у вигляді вигнутої кривої.

Встановлено, що прискорення вилки в момент контакту ролика з напрямними різко зростає незалежно від форм їх поверхонь.

Ключові слова: зубок часнику, садильний апарат, параметри апарата, показники садіння.

Semen Ya., Kuzenko L., Semen O. Research of kinematics of the chain and plunger planting device for garlic bulblet

The article presents the results of scientific researches of the problems concerning the mechanized planting of garlic and, in particular, the substantiation of the parameters of chain and plunger planting device design. The work describes theoretical study for the conditions of technological process of garlic bulblet planting with forced piece-laying of bulblet in the wedge-shaped groove with the bottom down, and with the sprout up, the interaction of the roller of the fork of the chain-plunger apparatus with a guide, which has the shape of an arc of a circle of a certain radius.

Under the conditions of the fork with the garlic tooth deepening in the soil, the interaction of the roller, fixed on the plunger rod with the guide in the form of a parabola arc, is considered in the article. It is revealed that in order to prevent jamming and to avoid of excessive wear of the contacting surfaces at the start of interaction of the roller with the guide, the normal to the guide should extend along the fork rod. This condition is obligatory one, regardless of the profile of the guide itself, which may look like an arc of a circle of the appropriate radius or arc of a parabola.

The studies have confirmed that the movement, velocity and acceleration of the fork at the moment of its insertion with the garlic tooth in the soil are the main kinematic indicators of the interaction of the studied elements of the planting machine.

Theoretical dependences were obtained to determine the main kinematic indices of the characterized process, which are solved by the numerical Runge – Kutta method with the following graphical representation of the obtained regularities.

The comparative evaluation of interaction of the roller, fixed on the plunger stem, and the surfaces of the guide profiles of different profiles is made by the author of the work. It is established that irrespective of the surface shapes of the studied guides, the displacement of the fork during interacting of the roller of the stem of the chain-plunger saddle apparatus with them is described by theoretical curves of a polynomial regularity.

The research investigate the change in speed of the fork movement in the vertical direction during the interaction of the roller with the guide in the form of an arc of a circle, which has a direct proportional dependence on the time of their contact. For a parabola guide, the change in fork speed over time is graphically displayed as a curved curve.

It is established that acceleration of the fork at the moment of the roller's contact with the guides is dramatically increased, regardless of the shape of their surfaces.

Key words: garlic cloves, planting machine, plant parameters, planting indices.

Постановка проблеми. Як відомо, кінематичні дослідження простих плоских механізмів можна проводити графічними методами [1; 2]. Вони доволі точні і за певних допущень застосовуються для практичних розрахунків механізмів підвищеної складності. Проте кожна задача, розв'язана графічно, може бути розв'язана й аналітично [4; 6; 9; 19]. Незважаючи на те, що в результаті часто отримують доволі складні формули, на практиці їх застосовувати зовсім не складно, бо розв'язуються вони за допомогою числових методів та прикладних комп'ютерних програм [5; 10]. Основною перевагою аналітичного дослідження кінематики процесу є можливість з'ясування взаємного впливу окремих ланок, вузлів чи механізмів на його перебіг загалом. Це дозволить у підсумку обґрунтувати параметри робочих органів машини або окремих її складових. При цьому важливо проаналізувати якомога більше можливих варіантів розв'язування конкретної задачі та встановити оптимальні параметри й режими роботи досліджуваних елементів як цілісної системи [3; 7; 11].

Безпосереднє правильно орієнтоване укладання зубків часнику в ґрунт у запропонованій конструкції машини забезпечує ланцюгово-плунжерний садильний апарат [8; 20]. У нижній його частині змонтовано напрямну, яка може мати вигляд дуги кола відповідного радіуса або параболи. Взаємодіючи з напрямною через ролик, шток із вилкою та зубком часнику, защемленим між її пальцями, переміщуються вертикально вниз, які примусово встромляють зубок у клиноподібну борозенку [12; 13].

Серед основних чинників, які впливають на перебіг вказаного процесу, можна виділити швидкість руху саджалки, конструктивні параметри окремих елементів ланцюгово-плунжерного садильного апарата, глибину садіння та розмір і профіль поверхні напрямної. Саме встановлення їх оптимальних параметрів у цілому гарантуватиме

ефективне укладання зубків часнику в борозенку. Цьому повинні передувати теоретичні дослідження, зокрема й кінематики процесу взаємодії між окремими елементами ланцюгово-плунжерного садильного апарата.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Створенню робочих органів сільськогосподарських машин передують теоретичні та експериментальні дослідження. Основною їхньою метою є узгодження конструктивних чи кінематичних параметрів і режимів роботи кожного об'єкта проектування, адаптованих до фізико-механічних властивостей або розмірних характеристик конкретного технологічного матеріалу [15; 17; 18].

Основними показниками, які характеризують кінематику процесу, є швидкість, переміщення та прискорення певної системи [16]. Для їх дослідження необхідно створити математичні моделі окремих елементів системи, простеживши їх взаємовплив на ефективність її роботи загалом.

Щодо розробленої конструкції саджалки [8; 20], то в науковій праці [14] отримано аналітичні залежності для встановлення сили присмоктування зубків до отворів на поверхні барабана, обґрунтовано його кутову швидкість обертання, узгоджену з конструктивними параметрами ланцюгово-плунжерного садильного апарата та досліджено рух і тривалість падіння зубка часнику після відокремлення його від отвору на поверхні барабана до моменту захоплення пальцями вилки. У публікації [20] проведено теоретичні дослідження взаємодії ролика, закріпленого на штоці плунжера, з напрямною, що має вигляд дуги заданого радіуса, при заглибленні вилки зі зубком часнику в ґрунт. Отримані в ній аналітичні залежності дозволили встановити швидкість V_e , прискорення a_e та глибину h занурення вилки в ґрунт разом із зубком часнику під час її вертикального переміщення вниз, а саме:

$$h = R_1 - R_1 \cos \beta, \quad (1)$$

$$V_6 = V_m \frac{V_m t}{\sqrt{R_1^2 - (V_m t)^2}}, \quad (2)$$

$$a_6 = \frac{V_m^2}{R_1} \cdot \frac{1}{(R_1^2 - (V_m t)^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (3)$$

де R_1 – радіус поверхні напрямної, м; β – центральний кут, на який спирається дуга кола напрямної, град; V_m – швидкість саджалки, м/с; t – час, с.

При цьому час, протягом якого ролик взаємодіє з напрямною, становить [20]:

$$T = \frac{R_1}{V_m} \sin \beta. \quad (4)$$

Попередній аналіз виконаних досліджень вказує на те, що отриманих результатів взаємодії ролика, закріпленого на штоці плунжера, з напрямною, яка має вигляд дуги заданого радіуса, недостатньо, щоб зробити коректні висновки про ефективність вказаного процесу, оскільки розглядалася тільки одна форма поверхні напрямної.

Очевидно, що, досліджуючи кінематику процесу взаємодії ролика штока ланцюгово-плунжерного садильного апарата зубків часнику з напрямною, потрібно врахувати інші можливі форми її поверхні, зокрема у формі параболи. Тільки після цього можна буде зробити порівняльний аналіз отриманих результатів, оцінити характер і встановити основні кінематичні параметри вказаного процесу.

Постановка завдання. Отже, наше завдання – отримати аналітичні залежності, які дають змогу встановити основні кінематичні параметри процесу взаємодії ролика штока ланцюгово-плунжерного садильного апарата зубків часнику з напрямною у вигляді параболи та провести порівняльний аналіз вказаного процесу за різних форм напрямної.

Виклад основного матеріалу. Як відомо з попередніх досліджень [20], напрямна 5 (рис. 1) слугує жорсткою опорою для ролика 6, який, контактуючи з її поверхнею, переміщує в корпусі плунжера 4 шток 2 з вилкою 1 і закріпленим у ній зубком часнику 7 до повного його входження в ґрунт.

У цій же науковій праці була окреслена основна умова взаємодії ролика з напрямною, що має вигляд дуги кола відповідного радіуса, а саме: відсутність явища удару при початковому їх контакті. Залишаючи вказану умову незмінною, розглянемо взаємодію ролика вилки з напрямною

O_1O , яка окреслена по дузі параболи і описується залежністю

$$x = p \cdot y^2, \quad (5)$$

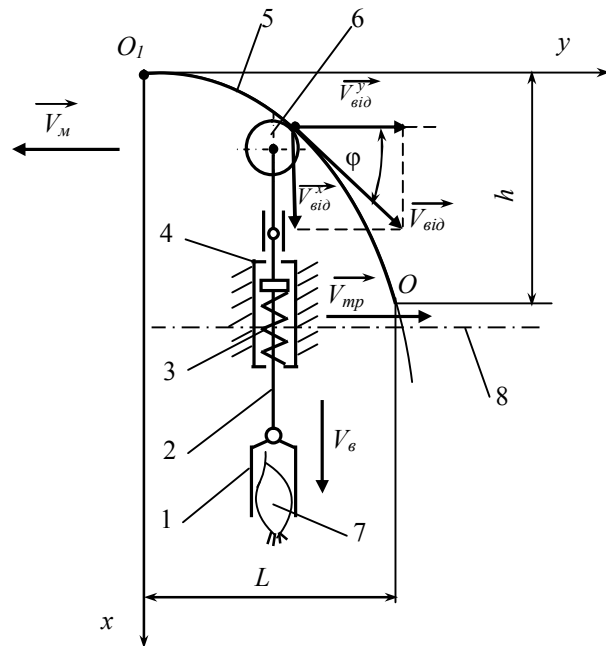


Рис. 1. Схема взаємодії ролика з напрямною, окресленою по дузі параболи:

- 1 – вилка; 2 – шток; 3 – пружина; 4 – плунжер; 5 – напрямна; 6 – ролик; 7 – зубок часнику, 8 – транспортер ланцюговий

Fig. 1. Scheme of interaction of the roller with the guide, outlined on the arc of the parabola:

- 1 – fork; 2 – rod; 3 – spring; 4 – plunger; 5 – roller; 6 – roller; 7 – garlic clove, 8 – conveyor chain.

де p – параметр, який характеризує співвідношення між переміщеннями вилки по вертикалі (h , м) і горизонталі (L , м) в певний період часу.

Максимальне значення h вибираємо з міркувань, що воно не перевищуватиме заданої глибини садіння зубка часнику, а відстань L орієнтовно відповідатиме кроку між плунжерами 4, закріпленими на ланцюговому транспортері 8.

Згідно з поданою схемою точка контакту O_1 є початком відліку системи координат, де вісь O_1y відповідає напрямку руху транспортера, а вісь O_1x – вертикального переміщення вилки вниз. За певний проміжок часу ролик 6 переміститься по напрямній 5 з початкової O_1 у кінцеву точку O . Вважаючи величини h і L відомими, параметр p матиме значення

$$p = \frac{h}{L^2}. \quad (6)$$

З урахуванням (6) рівняння (5) параболи набуде такого вигляду:

$$x = \frac{h}{L^2} \cdot y^2. \quad (7)$$

Під час взаємодії з напрямною у вигляді параболи ролик вилки перебуває в складному русі.

Розглянемо кінематику процесу, коли ролик займе довільне положення, яке визначається змінним кутом φ нахилу дотичної до осі O_y . Його переносна швидкість дорівнює швидкості руху машини (саджалки), а тому $\vec{V}_{\text{пер}} = \vec{V}_m$. Одночасно ролик рухається з відносною швидкістю $V_{\text{від}}$, проекції якої на осі координат становлять:

$$\begin{aligned} V_{\text{від}}^x &= \frac{dx}{dt} = 2 \frac{h}{L^2} y \frac{dy}{dt}; \\ V_{\text{від}}^y &= \frac{dy}{dt}. \end{aligned} \quad (8)$$

Враховуючи, що відносна швидкість дорівнює підкореневій сумі квадратів її проекцій на відповідні осі координат, будемо мати:

$$V_{\text{від}} = \sqrt{(V_{\text{від}}^x)^2 + (V_{\text{від}}^y)^2} = \sqrt{1 + (2 \frac{h}{L^2} y)^2} \frac{dy}{dt}. \quad (9)$$

Як відомо [6], тангенс кута φ нахилу дотичної обчислюється за формулою

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{dx}{dy} = 2 \frac{h}{L^2} y. \quad (10)$$

$$\text{Тоді } \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2 \frac{h}{L^2} y)^2}}, \quad (11)$$

$$\text{а } \sin \varphi = \frac{2 \frac{h}{L^2} y}{\sqrt{1 + (2 \frac{h}{L^2} y)^2}}. \quad (12)$$

Відомо, що під час взаємодії ролика з напрямною його абсолютна швидкість \vec{V}_a дорівнює геометричній сумі переносної $\vec{V}_{\text{пер}}$ та відносної $\vec{V}_{\text{від}}$ швидкостей, тобто [20]:

$$\vec{V}_a = \vec{V}_{\text{пер}} + \vec{V}_{\text{від}}. \quad (13)$$

Проектуємо рівність (13) на вісь O_y , враховуючи при цьому, що проекція абсолютної швидкості на цю вісь дорівнює нулю, оскільки вилка рухається в плунжері, який жорстко закріплений на ланцюговому транспортері та переміщується разом з ним, причому швидкості транспортера $\vec{V}_{\text{тр}}$ і машини \vec{V}_m рівні за значенням, але протилежні за напрямками ($\vec{V}_{\text{тр}} = -\vec{V}_m$):

$$0 = -\vec{V}_m + \vec{V}_{\text{від}} \cos \varphi. \quad (14)$$

З рівності (14), враховуючи (9) і (11), одержимо:

$$\frac{dy}{dt} = V_m. \quad (15)$$

Очевидно, що рівняння відносного руху ролика під час його взаємодії з напрямною, окресленою дугою параболи, матимуть такий вигляд:

$$\begin{aligned} y &= V_m t; \\ x &= \frac{h \cdot V_m^2}{L^2} \cdot t^2. \end{aligned} \quad (16)$$

При цьому тривалість T переміщення (занурення в ґрунт) вилки на глибину h (при $x = h$) згідно з (16) становить:

$$T = \frac{L}{V_m}. \quad (17)$$

Диференціюванням рівняння (16) знаходимо швидкість V_e і прискорення a_e вилки в часі:

$$V_e = \frac{dx}{dt} = 2 \frac{h \cdot V_m^2}{L^2} t; \quad (18)$$

$$a_e = \frac{d^2x}{dt^2} = 2 \frac{h \cdot V_m^2}{L^2}. \quad (19)$$

Розв'язок рівнянь (1) – (3), (16), (18) і (19) з урахуванням (4) й (17) числовим методом Рунге – Кутта в середовищі системи Matlab дав змогу встановити закономірності вертикального переміщення h (рис. 2), швидкості V_e (рис. 3) та прискорення a_e (рис. 4) вилки в часі взаємодії ролика штока ланцюгово-плунжерного садильного апарата з напрямною у вигляді дуги кола і параболи.

Як видно з рис. 2, теоретичні криві зміни переміщення вилки в часі в обидвох випадках досліджень мають поліноміальну закономірність. При цьому тривалість контакту ролика з напрямною змінюється залежно від глибини садіння зубків часнику та швидкості руху машини. Коли саджалка рухатиметься зі швидкістю $V_m = 1$ м/с, а глибина садіння h становитиме 0,05 м, то загальна тривалість занурення вилки в ґрунт $T = 0,12$ с. Якщо швидкість V_m залишити незмінною, а h збільшити до 0,07 м, тривалість T також залишиться на рівні 0,12 с.

Теоретичними дослідження встановлено, що для $h = 0,03$ м і $V_m = 0,5$ м/с загальна тривалість T занурення вилки в ґрунт становить 0,25 с. Для цієї ж глибини садіння і швидкості машини $V_m = 2,0$ м/с тривалість вертикального переміщення вилки при контакті ролика з напрямною є мінімальною – $T = 0,06$ с. Але в такому разі вилка зі зубком часнику має розміщуватися дуже близько до дна наперед утвореної борозенки.

Дослідженнями також визначено час, коли зубок часнику, защемлений між пальцями вилки, яка рухається вертикально вниз, починає контактувати з поверхнею ґрунту (дном борозенки).

Якщо до моменту взаємодії ролика з напрямною зубок у вилці буде розміщуватися на відстані 0,01 м від поверхні ґрунту, то контакт з нею згідно з рис. 2 відбудеться через 0,036 с (відповідає точці *a* напрямної у вигляді параболи) або через 0,048 с (відповідає точці *b* напрямної у вигляді дуги кола) від початку вертикального переміщення вилки. Решту часу зубок часнику з вилкою рухатиметься в ґрунті, долаючи його опір. Якщо зубок буде встановлений на відстані 0,02 м від поверхні, то початок контакту з нею відбудеться відповідно

через 0,06 с (точка *c*) та 0,074 с (точка *d*). У цьому разі, переміщуючись вертикально вниз, більшу частину часу вилка зі зубком рухається над землею. Саме тому важливим є вибір оптимального розміщення елементів ланцюгово-плунжерного садильного апарата над поверхнею ґрунту, а також формування профілю борозенки та її дна.

Знаючи час початку контакту зубка з поверхнею ґрунту, проаналізуємо швидкість вертикального переміщення вилки, скориставшись рис. 3.

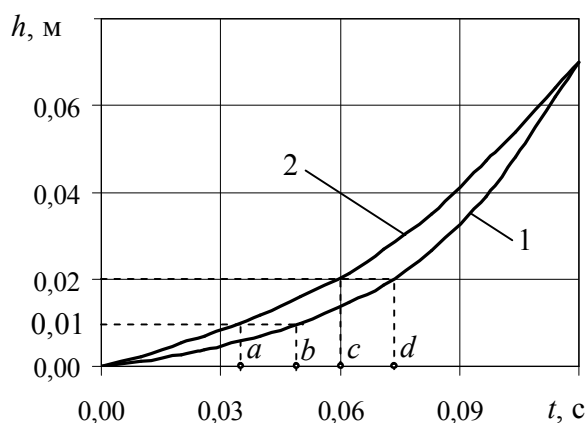


Рис. 2. Закономірність переміщення h вилки в часі t взаємодії ролика з напрямною у вигляді дуги кола (1) і параболи (2) за глибини садіння $H=0,07$ м та швидкості руху саджалки $V_m=1$ м/с

Fig. 2. The dependence of the h displacement of fork in t interaction time of the roller with the guide in the form of the arc of the circle (1) and the parabola (2) for the depth of the planting of $H = 0,07$ m and the velocity of the planter of $V_m = 1$ m/s.

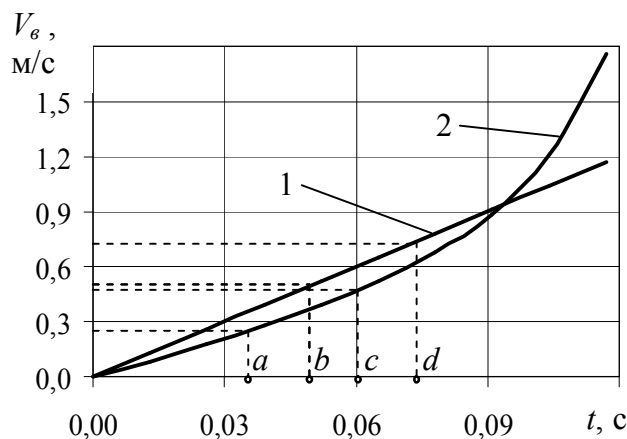


Рис. 3. Закономірність зміни швидкості V_g вилки в часі t взаємодії ролика з напрямною у вигляді дуги кола (1) і параболи (2) за глибини садіння $H=0,07$ м та швидкості руху саджалки $V_m=1$ м/с

Fig. 3. The dependence of the V_g velocity change of the fork in t interaction time of the roller with the guide in the form of the arc of the circle (1) and the parabola (2) for the depth of planting of $H = 0,07$ m and the velocity of the planter of $V_m = 1$ m/s

З отриманих графіків видно, що зміна швидкості V_6 руху вилки у вертикальному напрямку під час взаємодії ролика з напрямною у вигляді дуги кола має прямо пропорційну залежність від часу t їх контакту. Максимального свого значення 1,2 м/с вона досягає за 0,12 с, якщо глибина садіння становить 0,07 м, а швидкість машини $V_m = 1$ м/с. При цьому в момент контакту зубка з поверхнею ґрунту (дном борозенки), що відповідає часу $t = 0,048$ с (позначено точкою b), швидкість руху вилки $V_6 = 0,53$ м/с; відповідно для $t = 0,074$ с (позначено точкою d) швидкість руху вилки V_6 становить 0,73 м/с.

Для таких самих умов роботи ланцюгово-плунжерного садильного апарата, але взаємодії ролика з напрямною у вигляді параболи, зміна швидкості вилки в часі відображається графічно у вигляді вигнутої кривої, причому в останній третині відбувається її доволі різке зростання до максимального значення, що становить 1,8 м/с.

За початкової відстані від зубка, закріпленого у вилці, до поверхні ґрунту 0,01 м, що відповідає часу початку контакту $t = 0,036$ с (позначено точкою a), швидкість руху вилки $V_6 = 0,27$ м/с. Якщо зубок розміщений на відстані 0,02 м над поверхнею поля (дном борозни), а контакт його з ґрунтом відбувся через 0,06 с (відповідає точці c), то швидкість вертикального переміщення вилки V_6 становить 0,51 м/с.

Теоретичними дослідженнями встановлено, що зі збільшення швидкості руху саджалки до 1,5 м/с за незмінної глибини $H = 0,07$ м максимальне значення швидкості вертикального переміщення вилки V_6 сягає 1,74 м/с, якщо ролик взаємодіє з напрямною у вигляді дуги кола. При цьому загальна тривалість руху вилки вниз становить 0,08 с. Для таких самих умов роботи садильного апарата, але взаємодії ролика з напрямною у вигляді параболи, максимальна швид-

кість вилки $V_6 = 2,63$ м/с. Це вказує на те, що зі збільшенням швидкості руху саджалки зростає також швидкість вертикального переміщення вилки. При цьому загальна тривалість процесу садіння зубка, навпаки, зменшується.

Беручи за основу отримані значення часу початку контакту зубка часнику з поверхнею ґрунту, проаналізуємо прискорення a_6 вилки за її вертикального переміщення, відображені графічно на рис. 4.

Згідно з наведеними графіками, очевидним є різке зростання прискорення вилки в момент контакту ролика незалежно від форми поверхні напрямної. Проте подальший перебіг процесу для кожного випадку має суттєві відмінності. Так, для напрямної у вигляді дуги кола прискорення a_6 залишається незмінним протягом усього наступного часу контакту з нею ролика штока ланцюгово-плунжерного садильного апарата і не перевищує 10 м/с^2 . Якщо поверхня напрямної має вигляд параболи, то прискорення вилки, що з нею контактує через ролик, наближено теж мають вигляд параболи. При цьому для початкового положення зубка над поверхнею ґрунту 0,02 м половину часу (відповідає точці c) вилка переміщується з прискоренням, що плавно зростає від 6,1 до 10 м/с^2 . Контакт зубка часнику з ґрунтом і подальше проникнення в нього відбувається з доволі різким зростанням прискорення вилки, яке досягає максимального значення $59,8 \text{ м/с}^2$.

На основі теоретичних досліджень встановлено, що закономірності зміни прискорень a_6 вилки в часі t взаємодії ролика з напрямними залишаються майже незмінними для різних глибин садіння зубків часнику і швидкості руху саджалки. У цих випадках змінюється значення прискорення і загальна тривалість контакту ролика з напрямною.

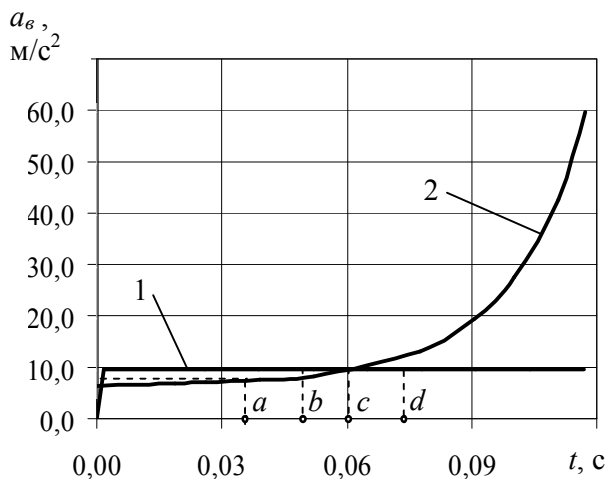


Рис. 4. Закономірність зміни прискорення a_6 вилки в часі t взаємодії ролика з напрямною у вигляді дуги кола (1) і параболи (2) за глибини садіння $H=0,07$ м та швидкості руху саджалки $V_m=1$ м/с

Fig. 4. The dependence of the change of the a_6 fork acceleration in t interaction time of the roller with the guide in the form of the arc of the circle (1) and the parabola (2) for the depth of planting of $H = 0,07$ m and the velocity of the planter of $V_m = 1$ m/s

Висновки. Теоретичними дослідженнями взаємодії ролика штока ланцюгово-плунжерного садильного апарата зубків часнику з напрямною встановлено таке:

1. Якість виконання технологічного процесу саджалки забезпечиться в разі, коли швидкість її руху та швидкість переміщення ланцюгового транспортера садильного апарата будуть однаковими за значенням, але протилежними за напрямками безпосередньо в момент контакту вилки зі зубком часнику поверхні поля (дна борозенки).

2. У початковий момент взаємодії ролика з напрямною у вигляді дуги кола явище удару буде відсутнє, якщо центр її радіуса лежатиме на нормалі, що проходить уздовж осі штока вилки, а для напрямної у вигляді параболи явище удару залежатиме від параметра p , який характеризує співвідношення між переміщеннями вилки по вертикалі (h , м) і горизонталі (L , м) в певний період часу.

3. Незалежно від форм поверхонь досліджуваних напрямних, переміщення вилки в часі взаємодії ролика штока ланцюгово-плунжерного садильного апарата з ними описуються теоретичними кривими, що мають поліноміальну закономірність, а на тривалість їх контакту впливають глибина садіння зубків часнику та швидкість руху машини.

4. Зміна швидкості V_e руху вилки у вертикальному напрямку під час взаємодії ролика з напрямною у вигляді дуги кола має прямо пропорційну залежність від часу t їх контакту; для таких самих умов роботи ланцюгово-плунжерного садильного апарата, але взаємодії ролика з напрямною у вигляді параболи, зміна швидкості вилки в часі відображається графічно у вигляді вигнутої кривої, причому в останній третині відбувається її доволі різке зростання до максимального значення, що становить 1,8 м/с.

5. Прискорення вилки в момент контакту ролика з напрямними різко зростає незалежно від форм їхніх поверхонь, а потім для напрямної у вигляді дуги кола прискорення a_e залишається незмінним протягом усього наступного часу контакту з нею ролика штока ланцюгово-плунжерного садильного апарата і не перевищує 10 м/с², а для поверхні напрямної у вигляді параболи прискорення наближено теж мають параболічну закономірність, причому контакт зубка часнику з грун-

том і подальше проникнення в нього відбуваються з доволі різким зростання прискорення вилки, яке досягає максимального значення 59,8 м/с².

Бібліографічний список

1. Артоболевский И. И. Теория механизмов. Москва: Наука, 1965. 776 с.
2. Баранов Г. Г. Курс теории механизмов и машин. Москва: Машиностроение, 1966. 510 с.
3. Василенко П. М., Василенко В. П. Методика построения расчетных моделей функционирования механических систем. Киев: УСХА, 1980. 135 с.
4. Василенко П. М. Основи аналітичних методів землеробської механіки. Київ: НАУ, 1998. 29 с.
5. Вступ до числових методів: навч. посіб. для вищ. закл. освіти / П. І. Каленюк, В. А. Бакалець, І. І. Бакалець, Н. В. Горбачова, П. Л. Сохан; Держ. ун-т «Львівська політехніка». Львів, 2000. 145 с.
6. Горячкин В. П. Собрание починений: в 3 т. Изд. 2-е. Москва: Колос, 1968. Т. 1. 720 с.
7. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин. Т. 1, ч. 2: Машини для сівби та садіння. Харків: Око, 2002. 452 с.
8. Кузенко Д. В., Семен О. Я. Машина для садіння зубків часнику. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2017. № 21. С. 115–119.
9. Павловський М. А. Теоретична механіка: підручник. 2-ге вид., стереотип. Київ: Техніка, 2004. 512 с.
10. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. Москва: Наука, 1989. 430 с.
11. Севостьянов І. В. Теорія технічних систем: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2014. 181 с.
12. Семен О. Я. Обґрунтування способу садіння часнику машиною з ланцюгово-плунжерним садильним апаратом. *Перспективи і тенденції розвитку конструкторії та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь*: матеріали IV Всеукр. наук.-практ. конф. (Житомир, 28–29 берез. 2018 р.). Житомир, 2018. С. 27–29.
13. Семен О. Я. Саджалка зубків часнику. *Молодь та сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі*: матеріали IV Міжнар. форуму молоді (Харків, 5–6 квіт. 2018 р.). Харків: ХНТУСГ, 2018. С. 17.
14. Семен О. Я., Кузенко Д. В., Семен Я. В. Теоретичні дослідження параметрів системи «барабан – зубок часнику – вилка» саджалки часнику. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2018. № 22. С. 77–85.
15. Семен Я. В., Ніщенко І. О. Аналітична модель підсистеми «гідродвигун – віброзбурювач коливаль». *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2005. № 9. С. 222–227.

16. Семен Я. В., Шевчук Р. С., Ріпка І. І., Ніщенко І. О. Теоретичний аналіз взаємодії елементів системи «енергетичний засіб – струшувач – дерево». *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2008. № 12, т. 1. С. 291–297.
17. Шевчук Р. С., Миронюк О. С. Модель процесу розгону системи «двигун–струшувач–дерево». *Сільськогосподарські машини*. 2000. Вип. 6. С. 201–208.
18. Kuzenko D., Khrushch O., Semen Ya. Features of mathematical modeling of mechanized operations for corn harvesting. *MOTROL Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2017. Vol. 19, No. 2. P. 41–45.
19. Malkov V., Vlasova A., Nosko P., Stavitsky V. Method of the dynamic analysis of the mechanism. *TEKA Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2011. Vol. XI A. P. 145–150.
20. Semen O., Kuzenko D., Semen Ya. A machine for oriented planting of garlic teeth. *TEKA Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2017. Vol. 17, No. 2. P. 55–60.

Стаття надійшла 26.09.2019

Розділ 3

ЕНЕРГЕТИКА АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

УДК 631.364:621.311.243

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИВАЛОСТІ СУШІННЯ ФРУКТІВ У ГЕЛІОСУШАРЦІ

**Віталій Боярчук, к. т. н., Сергій Коробка, к. т. н.,
Михайло Бабич, к. т. н., Роман Кригуль, к. т. н.**
*Львівський національний аграрний університет,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н,
Львівська обл., Україна,
e-mail: korobkasv@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.043>

Боярчук В., Коробка С., Бабич М., Кригуль Р. Методика дослідження тривалості сушіння фруктів у геліосушарці

У статті наведено методику планування багатофакторного експерименту для визначення основних показників тривалості процесу сушіння в геліосушарці: швидкості сушіння, критичної вологості фруктів, коефіцієнта сушіння. На основі аналізу існуючих рівнянь розрахунку тривалості процесу конвективного сушіння було вдосконалено рівняння О. В. Ликова (4) для умов геліосушарки. В основі цього рівняння подано спрощений механізм тепло- і масообміну, який описано диференціальним рівнянням тепломасоперенесення.

Отримано рівняння регресії, за допомогою яких можна розрахувати залежності швидкості сушіння, критичної вологості фруктів, коефіцієнта сушіння в області зміни параметрів теплоносія: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}$.

Встановлена кількість необхідних експериментів для нашого випадку 3^3 . Розроблено матрицю планування експерименту та отримано результати експерименту для лінійних функцій: швидкості сушіння, критичної вологості, коефіцієнта сушіння відносно значень досліджуваних факторів: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}$.

Розроблено математичну модель дисперсійного аналізу технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці. Розраховано й перевірено оцінку адекватності моделі за критеріями Фішера та Стьюдента.

Обґрунтовано оптимальні режими роботи геліосушарки в області: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}$. Виконано опис впливу конструктивних параметрів (площі колектора $S_{пк} = 1,5 \text{ м}^2$ і маси теплового акумулятора $m_{та} = 50 \text{ кг}$) на закономірності зміни теплотехнічних параметрів навколишнього середовища (температури навколишнього середовища $T_{н.ср.} - 16 - 32 \text{ }^\circ\text{C}$, рівня сонячної активності $I_{н.ср.} - 100 - 824 \text{ Вт/м}^2$) і на тривалість процесу сушіння фруктів за таких параметрів: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}$.

Ключові слова: геліосушарка, критерій оптимізації, сушіння фруктів, тепловий акумулятор.

Boiarchuk V., Korobka S., Babych M., Krygul R. Method of research of fruit drying duration in the solar dryer

The article describes the method of planning a multifactorial experiment to determine the main indicators of the duration of the drying process in a solar dryer: speed of drying, critical moisture of fruits, coefficient of drying.

Having analyzed the existing equations for calculating of the duration of the convective drying process, the O. Lykov equation (4) for the conditions of a solar dryer was improved. The equation is base on a simplified mechanism of heat and mass exchange, which is described by the differential equation of heat and mass transfer.

The article presents the obtained regression equation, which can be used to calculate dependence of the drying rate, critical humidity of the fruit, drying coefficient within the area of changing of coolant parameters: $10 \text{ W/m}^2 \leq Q \leq 460 \text{ W/m}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{hc} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ m/s} \leq v_{hc} \leq 2,5 \text{ m/s}$.

The number of experiments, required for our case, was determined as 3^3 . The experimental design matrix was developed and the experimental results were obtained for linear functions: drying rate, critical humidity, drying factor referring to the values of the studied factors: $10 \text{ W/m}^2 \leq Q \leq 460 \text{ W/m}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{hc} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ m/s} \leq v_{hc} \leq 2,5 \text{ m/s}$.

The work develops a mathematical model of dispersion analysis of the technological process of fruit drying in a solar dryer. The model adequacy is estimated and verifies according to Fisher and Student criteria.

The research substantiates optimum operating modes of the solar dryer in the region: $10 \text{ W/m}^2 \leq Q \leq 460 \text{ W/m}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{hc} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ m/s} \leq v_{hc} \leq 2,5 \text{ m/s}$. The work describes influence of design parameters (collector area $S_{hc} = 1,5 \text{ м}^2$ and mass of thermal accumulator $m_{ha} = 50 \text{ кг}$) on the regularities of change of thermal technical parameters of the

environment (ambient temperature $T_h = 16 - 32$ °C, the level of solar activity $I_n = 100 - 824$ W/m²) and duration of the fruit drying process according to the following parameters: $10 \text{ W/m}^2 \leq Q \leq 460 \text{ W/m}^2$; $20 \text{ °C} \leq T_{hc} \leq 50 \text{ °C}$; $1 \text{ m/s} \leq v_{hc} \leq 2,5 \text{ m/s}$.
Key words: solar dryer, optimization criterion, fruit drying, heat accumulator.

Постановка проблеми. Конвективне сушіння фруктів – це складний тепломасообмінний процес. Для його дослідження необхідно визначити теплофізичні, фізико-механічні, хімічні та інші властивості фруктів як об'єкта сушіння. Крім цього, необхідно вибрати та обґрунтувати режими процесу з подальшим створенням раціональних конструкцій енергоощадних сушильних установок. Розробка нових і вдосконалення існуючих технологій і техніки сушіння регламентуються як інтенсивностями тепловологообміну між джерелом (генератором) тепла та об'єктом сушіння, так і інтенсивностями тепло-, масоперенесення всередині висушуваного матеріалу. Тому цілеспрямований пошук способів інтенсифікації процесу конвективного сушіння повинен передбачити створення нових прогресивних технологій. Також важливою є розробка універсальних методів синтезу та аналізу залежностей тепломасообмінних характеристик і тривалості процесу сушіння від теплофізичних властивостей фруктів та фізичних параметрів навколишнього середовища.

Отримані раніше принципово важливі результати досліджень вчених не повністю відображають складну кінетику й динаміку тепломасообмінних процесів наведених вище об'єктів. Зокрема, у цих дослідженнях не враховано тривалості процесу сушіння, зміни фізичних параметрів навколишнього середовища, теплофізичних параметрів висушуваних фруктів та їх взаємозв'язку зі самими тепломасообмінними процесами. Тому розробка методики дослідження сушіння фруктів у геліосушарці, яка б враховувала означені проблеми, з подальшим удосконаленням технології та техніки сушіння є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виконаний аналіз чинних методик дослідження тривалості технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці свідчить про належне їх опрацювання.

Спочатку розглянемо детальніше особливості процесу конвективного сушіння, запропоновані О. В. Ликовим [5]. У процесі сушіння потік повітря зі сталою вхідною температурою і вологістю вологовмістом продукту зменшується за нелінійною залежністю. При малих швидкостях сушіння на відповідних часових залежностях виділяють три стадії процесу: підігріву, сталої та

спадної швидкості [5; 6]. Модель тристадійного процесу сушіння відповідає кінетиці масоперенесення в структурованих біологічних тканинах і зручна для планування параметрів сушарки. Для інженерних розрахунків важливо мати наближені співвідношення між середнім вологовмістом W і тривалістю сушіння τ , а також прості формули для розрахунку теплового балансу й витрати теплоносія. Стадія сталої швидкості сушіння ($N = \text{const}$) триває до стану критичної вологості W_k :

$$N = \frac{dW}{d\tau} = \frac{W_0 - W_k}{\tau}, \text{ \% / с або \% / год.} \quad (1)$$

Процес сушіння фруктів у геліосушарці характеризується зміною вологості висушуваного матеріалу в часі. Про швидкість сушіння можна судити за кількістю вологи, випаруваної з висушуваного матеріалу за період часу, \% / с або \% / год.

Натомість стадію спадної швидкості сушіння прийнято описувати таким диференціальним рівнянням:

$$-\frac{dW}{d\tau} = K \cdot (W - W_p), \quad (2)$$

де K – коефіцієнт пропорційності (сушіння), який визначають графічним методом з експериментальної кривої сушіння, побудованої у напівлогарифмічних координатах. Типовим розв'язком цього рівняння є експоненційна залежність. Тому загальну тривалість сушіння прийнято оцінювати сумою двох часових інтервалів сталої та спадної швидкості, а саме:

$$\tau = \frac{W_0 - W_p}{N} - \frac{1}{\chi N} \cdot [1 + \ln \chi \cdot (W - W_p)], \quad (3)$$

де $\chi \approx 1,8/W_p$ – відносний коефіцієнт сушіння.

Відтак для оцінки загальної тривалості сушіння потрібно попередньо задати такі три параметри: W_0 , W_p – початковий і кінцевий (рівноважний) вологовміст та N – швидкість вологовиділення. Останній параметр визначають експериментально при заданих параметрах потоку агента сушіння та висушуваного матеріалу, але з великою суб'єктивною похибкою. Тому на практиці параметри сушіння оцінюють за результатами дослідження стандартизованих (модельних) матеріалів при заданих температурах і швидкостях потоку повітря.

За результатами обробки численних експериментальних кривих сушіння встановлено, що добуток $N \cdot \tau$ при заданій вологості матеріалу є сталою величиною. Тому за наявності однієї

кривої сушіння можливо розрахувати криву для будь-якого іншого режиму. Наприклад, розрахунків параметрів сушіння можна провести за результатами досліджень, наведених у спеціалізованій літературі [1; 2] з іншою метою.

Однак описана методика є дуже загальною і не відповідає сучасним досягненням теорії конвективного сушіння, а саме тепло-, масоперенесенню й тепломасообміну. Зокрема, результати дослідження поглиблення зони випаровування вологи з фруктів описують критерієм швидкості сушіння. На поверхні фруктової сировини волога, як залишок після миття, існує тільки на стадії прогрівання. Решту часу рідка фаза є багатокомпонентним розчином органічних та мінеральних речовин, а не вільною рідиною, як у класичних дисперсних матеріалах неорганічного походження. Тому під час розрахунку тривалості сушіння фруктів межу між критерієм швидкості сушіння та процесу видалення вологи провести неможливо.

У науковій праці [15] встановлено низку важливих закономірностей, які відбуваються за певної тривалості процесу сушіння фруктів, що пов'язані з визначенням напружень, котрі виникають усередині висушуваного матеріалу під час сушіння. Але, як показав аналіз виконаних досліджень, запропоновані в них методи розрахунку не завжди дають змогу визначити їх дійсну величину й розрахувати раціональні параметри сушильного агента. У праці [15] під час розв'язання цієї задачі було запропоновано використовувати диференціальне рівняння розрахунку тривалості сушіння О. В. Ликова, що відображає модель тристадійного процесу сушіння лише на першому етапі, а всі інші етапи сушіння ним не брались до уваги.

У праці [13] обґрунтовано технологічні параметри геліосушарки тунельного типу для сушіння плодів і овочів. Зокрема, запропоновано інженерні науково-методичні засади розрахунку тривалості сушіння фруктів, що ґрунтуються на методиці розрахунку тривалості сушіння в інфрачервоних сушарках. Однак автори нехтують розрахунком тривалості процесу сушіння фруктів у геліосушарці, що залежить від конструктивних параметрів (площі повітряного колектора, маси теплоакumuлюючого матеріалу), теплотехнічних параметрів навколишнього середовища, які пов'язані з рівнем сонячної активності за один цикл сушіння. Запропонована методика не може бути використана, тому що в ній відсутня конкретизація (оцінка) складових теплотехнічних параметрів теплоносія й технологічних параметрів

швидкості і тривалості процесу сушіння за умов комбінованого впливу сонячних променів і теплового акумулятора.

Автори у роботі [11] виконують аналіз сушильних установок з використанням сонячної енергії та обґрунтовують конструктивно-технологічні параметри. Розрахунки зводяться до вирівнювання й стабілізації режиму сушіння під час мінливої освітленості за рахунок резервного електронагрівача та тривалості процесу сушіння фруктів. Таку можливість оперативної зміни одночасно двох параметрів теплоносія – температури і швидкості – у ранковий і вечірній час здійснювали за допомогою вмикання електронагрівача. Однак у запропонованій методиці під час розрахунку тривалості процесу сушіння фруктів у геліосушарці не брали до уваги залежності тривалості процесу від конструктивних параметрів нагрівального обладнання (площі повітряного колектора, маси теплоакumuлюючого матеріалу) для посилення інтенсифікації і скорочення тривалості процесу сушіння в ранковий і вечірній час замість вмикання електронагрівача.

Невирішеною частиною проблеми також є наближений розрахунок тривалості конвективного сушіння фруктів у геліосушарці, що не потребує тривалих дослідів і може використовуватись під час перехідної вологості, що відрізняється від кінцевої вологості висушуваного матеріалу за атмосферного сушіння відповідно до ДСТУ 3808.1-80, ДСТУ 7319-80 [14].

Таким чином, обґрунтування оптимальних режимів роботи геліосушарки із забезпеченням найбільшої ефективності процесу сушіння мінімальними енергетичними витратами є важливим завданням. Складність цього процесу зумовлена взаємозалежністю енергетичних, кінетичних, динамічних параметрів та перебігом тепломасообмінних процесів і високою мінливістю фізичних властивостей фруктів. Натомість залишаються малодослідженими питання інтенсифікації та підвищення ефективності процесу сушіння фруктів за рахунок використання сонячної енергії та сушарок, принцип роботи яких заснований на її використанні, та розрахунку тривалості процесу сушіння. Оскільки більшість розроблених конструкцій існуючих сушарок виконано для країн зі спекотним кліматом, а їхній принцип роботи та процес сушіння досліджено в лабораторних умовах або за допомогою імітаційних моделей під час комп'ютерного моделювання, тому відомі конструкції сушарок потребують модифікації й удосконалення з метою підвищення ефективності роботи в умовах помірною континентального

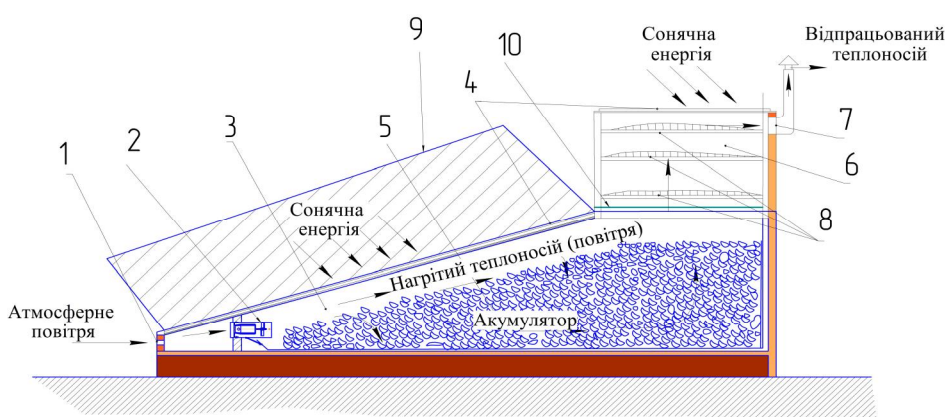
клімату Західного Полісся України (зокрема для м. Корця Рівненської області) та зменшення капітальних і експлуатаційних затрат.

Постановка завдання. Метою досліджень є проведення уточнювальних розрахунків тривалості конвективного сушіння фруктів у геліосушарці з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором.

Виклад основного матеріалу. Були проведені дослідження технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором, розроблений на кафедрі енергетики Львівського

національного аграрного університету. Ця установка є активною системою використання сонячної енергії (рис. 1), технічні характеристики подано в табл. 1 [14].

Геліосушарка працює таким чином. Решета 8 заповнюють нарізаними плодами та закладають у сушильну камеру. Повітря зі зовнішнього середовища надходить у повітропровід, під абсорбером, через шар теплоакумулюючого матеріалу, нагрівається та потрапляє в сушильну камеру. Частина тепла акумулюється в тепловому акумуляторі. Відпрацьований теплоносій видаляється природною конвекцією в навколишнє середовище через витяжний канал.



a



б

Рис. 1. Геліосушарка з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором: *a* – конструктивно-технологічна схема; *б* – загальний вигляд; 1 – вхідний канал; 2 – вентилятор з нагрівачем; 3 – повітропровід; 4 – повітряний колектор; 5 – теплоакумулюючий матеріал (на основі гальки); 6 – сушильна камера; 7 – витяжний канал; 8 – решета; 9 – плоский дзеркальний концентратор; 10 – заслінка

Fig. 1. Solar dryer with thermal battery and flat mirror concentrator: *a* – design and technological scheme; *б* – general view; 1 – input channel; 2 – fan with heater; 3 – air duct; 4 – air collector; 5 – heat accumulating material (pebble); 6 – drying chamber; 7 – return channel; 8 – sieves; 9 – flat mirror concentrator; 10 – valve

Таблиця 1. Технічні характеристики геліосушарки з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором [14]**Table 1.** Technical characteristics of a solar dryer with thermal battery and flat mirror concentrator [14]

Параметр	Показник
Маса висушеного матеріалу $m_{\text{ф}}$, кг	5,5
Площа повітряного колектора $S_{\text{пк}}$, м ²	1,5
Площа плоского дзеркального концентратора L , м ²	1,5
Маса теплового акумулятора $m_{\text{та}}$, кг	50
Внутрішній об'єм сушильної камери $V_{\text{вн.ск}}$, м ³	0,5

Перевагою сушарок такого типу є часткова залежність від сонячної активності. Це зумовлює її повну географічну орієнтацію та конструктивні характеристики, можливість застосування додаткового джерела електроенергії для живлення вентилятора і нагрівача, а також значну економію енергоресурсів у ранковий, вечірній і нічний час за рахунок використання плоского дзеркального концентратора і теплового акумулятора.

Методика підготовки фруктів до сушіння.

Дослідження проводили на фруктах трьох видів: яблука Семирічка, груші Столовка, Кюре, які найчастіше зустрічаються в особистих селянських господарствах, з початковою вологістю $W_n = 85,2 \div 70,3$ %. Маса однієї партії при разовому завантаженні в геліосушарку сирової фруктової сировини становить 5,5 кг [17].

Зміну вологовмісту фруктів залежно від обробки, розміру і форми нарізки матеріалу досліджували на лабораторній установці за умов:

1. Впливу способу бланшування на процес сушіння фруктів. Підготовка сировини: було проведено сортування, миття фруктів, нарізку кружальцями і дольками завтовшки $5 \div 11$ мм.

Нарізані фрукти бланшували трьома способами [17]:

- 1) бланшування в розчині цукру 3 хв (на 1 л води 10 г цукру);
- 2) бланшування в розчині солі 3 хв (на 1 л води 10 г солі);
- 3) без обробки.

2. Впливу товщини нарізки на процес сушіння фруктів.

Підготовка сировини: миття фруктів, нарізка кружальцями й дольками різної товщини [17]:

- 1 варіант – кружечки 5 мм;
- 2 варіант – кружечки 8 мм;
- 3 варіант – кружечки 11 мм;
- 4 варіант – дольки 5 мм;
- 5 варіант – дольки 6 мм;
- 6 варіант – дольки 7 мм. Сушіння в геліосушарці;

7 варіант – дольки 7 мм. Сушіння в шафі ВСП-50.

Після обробки фрукти уклали на решета й поміщали в сушильну камеру. У ході сушіння безперервно вимірювали вологість фруктів. Закінчення сушіння визначали зважуванням до постійної маси. Для кожного варіанта визначали тривалість сушіння фруктів у геліосушарці та порівнювали з теоретичною розрахунковою тривалістю процесу.

Таким чином, розроблена конструкція геліосушарки відповідає концепції активної сонячної енергетичної установки. Водночас суміщені в один блок повітряний колектор і тепловий акумулятор конструктивно не відповідають класичним зразкам сонячних теплових установок. Для розробленої установки теоретично не встановлені співвідношення між часовими залежностями тривалості конвективного сушіння і технологічними параметрами процесу. Наприклад, неможливо окремо провести випробування повітряного колектора і дзеркального концентратора за стандартною методикою або розрахувати динамічні властивості насипного теплового акумулятора чи дослідити тривалість процесу сушіння. Тому параметри, за якими оцінюють ефективність прийнятих рішень, встановлювали експериментально під час розрахунково-кількісних експериментальних досліджень тривалості сушіння фруктів у геліосушарці, а саме: джерело теплової енергії (повітряний колектор) – геліосушарка – акумулятор тепла – дзеркальний концентратор – середовище – об'єкт сушіння.

Отож, під час сушіння фруктів у геліосушарці впродовж доби спостерігається нерівномірна періодичність надходження потоку сонячної енергії. Тому температура теплоносія тут змінюється протягом доби залежно від погоди й пори року. У зв'язку з цим закономірності, що описують тривалість процесу сушіння, повинні відтворювати цю періодичність. Тому на основі аналізу існуючих рівнянь розрахунку тривалості

процесу конвективного сушіння для умов геліосушарки було вдосконалено рівняння О. В. Ликова (3) [5; 6], в основу якого покладено

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_{нас} = \frac{W_n - W_{кр.}}{N} + \frac{1}{K} \cdot \ln \left[\frac{W_{кр.} - W_p}{W_k - W_p} \right] + \frac{\Delta m \cdot c_{np} \cdot (T_{\phi 2} - T_{\phi 1}) + h_{шар} \cdot \rho_{np} \cdot (\sum S_{реш}) \cdot c_{np} \cdot (T_{mn3} - T_{mn2})}{S_{ск} \cdot v_{тн} \cdot \rho_{тн} \cdot c_{тн} \cdot (T_{mn2} - T_{mn1}) / \tau_{роб} - (S_{нк} \cdot E) - S_{зс} \cdot K \cdot (T_{кам} - T_{нс}) - V_{та} \cdot \rho_{та} \cdot c_{та} \cdot (T_{та2} - T_{та1}) / \tau_{роз}}, \quad (4)$$

де τ – тривалість сушіння фруктів, с; W_n – початкова вологість фруктів, яка визначається експериментально %; N – швидкість сушіння, що визначається за допомогою експериментів, %/с; K – коефіцієнт сушіння, що визначається експериментально, с; W_k – кінцева вологість фруктів, що визначається експериментально, %; $W_{кр.}$ – критична вологість фруктів у критичній точці процесу сушіння, що визначається експериментально, %; W_p – рівноважна вологість фруктів для заданого режиму сушіння, %; E – енергетична освітленість, Вт/м²; $S_{ск}$ – площа сушильної камери, м²; $\tau_{роб}$ – тривалість нагрівання сушильної камери, с; $v_{тн}$ – швидкість теплоносія, м/с; $\rho_{пр}$, $\rho_{тн}$, $\rho_{та}$ – густина відповідно фруктів, теплоносія і теплоакумулюючого матеріалу, кг/м³; $c_{тн}$, $c_{пр}$, $c_{та}$ – питома теплоємність відповідно теплоносія, фруктів і теплоакумулюючого матеріалу, Дж/(кг·°C); $h_{шар}$ – висота шару фруктового матеріалу на решетах, мм; $T_{та1}$, $T_{та2}$ – температура на вході теплового акумулятора і виході з нього, °C; $S_{реш}$ – площа решіт, м²; $S_{нс}$ – площа геліосушарки, м²; $T_{нс}$ – температура навколишнього середовища, °C; K – коефіцієнт теплопередачі через корпус геліосушарки, Вт/(м²·°C); $\tau_{роз}$ – тривалість розрядки теплового акумулятора, с.

Для визначення невідомих залежностей регресії швидкості сушіння, критичної вологості фруктів, коефіцієнта сушіння, під час розрахунку тривалості сушіння та обґрунтування параметрів теплоносія в геліосушарці можна використовувати метод лінійного планованого багатофакторного експерименту (БПЕ) [18]. Цей метод дозволяє забезпечити універсальність і можливість за наявності невеликого обсягу вхідної інформації провести дослідження й отримати достовірні результати та не має жорсткої регламентації стосовно застосування. Залежно від поставленої мети нами було вибрано тип експерименту, який буде покладено в основу методики планування, а саме вид графічної функції відгуку, способи оцінки отриманої інформації тощо [12].

Діючі фактори можуть бути вибрані за допомогою багатофакторного планованого експери-

спрощений механізм тепло- і масообміну, що описується диференціальним рівнянням тепло-масоперенесення:

менту. Фактори, які впливають, можуть бути обрані за допомогою спеціальних вибіркового експериментів або на основі багатофакторного експерименту. За результатами таких експериментів формується рівень варіювання факторів. Побудова матриці планування експерименту, математичної моделі й аналіз отриманих результатів мають формалізований характер і дають можливість прийняти та обґрунтувати низку конструктивних та технологічних рішень. Наприклад, поліпшення технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці [9].

Планування експерименту пов'язане з вивченням залежності критеріїв оптимізації від величини керуючих параметрів. Тому після постановки задачі загальний вигляд моделі об'єкта дослідження спрощується до такого: $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Загальну кількість дослідів N при багатофакторному плануванні експерименту визначають зі співвідношення

$$N = 2n^k, \quad (5)$$

де N – загальне число різних точок у плані; k – основне число факторів.

Оскільки фактори процесу сушіння неоднорідні і мають різні одиниці виміру, зводимо їх до єдиної системи обчислення за допомогою переходу від дійсних значень факторів до кодованих за формулою

$$x_i = \frac{z_i - z_{oi}}{\varepsilon}, \quad (6)$$

де x_i – кодоване значення фактору (безрозмірна величина); z_i і z_{oi} – натуральне значення фактору (відповідно його поточне значення та значення на нульовому рівні); ε – натуральне значення інтервалу варіювання фактору.

Рівняння математичних моделей БПЕ були отримані у закодованій формі. Тут під час заміни кодованих значень факторів абсолютних величин можна перейти від системи координат у натуральних одиницях до початкової системи в закодованій формі:

$$x_1 = \frac{Q - 256}{156}; x_2 = \frac{T_{mn} - 41,3}{29,3}; x_3 = \frac{\vartheta_{mn} - 1,8}{1,2}. \quad (7)$$

Якщо отримати рівняння регресії зі змінними в натуральному масштабі, необхідно підставити x_i за формулою кодування і зробити прості арифметичні перетворення в рівнянні, тоді математична модель набуває натурального вигляду.

Використовуючи рівняння (7), які пов'язують кодовані й іменовані значення факторів, під час розрахунку вибраної лінійної моделі рівнянь регресії будемо користуватися критерієм оптимізації:

$$y = b_0 + \sum_1^k b_i \cdot x_i + \sum_1^k b_{i \cdot j} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_1^k b_{i^2} \cdot x_i^2, \quad (8)$$

де y – параметр оптимізації; k – число факторів; b_0 – вільний член, рівний відгуку при $x'=0$; b_j – оцінка коефіцієнта регресії, відповідного i -го фактору; $b_{i \cdot j}$ – оцінка коефіцієнта рівняння регресії, відповідної взаємодії факторів; x – кодоване значення факторів ($i = 1, 2, 3, \dots n$).

Коефіцієнти регресії розраховують за методом найменших квадратів, використовуючи рівняння [1; 10]:

$$b_0 = c_1 \cdot \sum_1^n y_u - c_2 \cdot \sum_1^n \cdot \sum_1^n x_{iu} \cdot y_u; \quad (9)$$

$$b_i = c_3 \cdot \sum_1^n x_{iu} \cdot y_u; \quad (10)$$

$$b_{ij} = c_4 \cdot \sum_1^n x_{iu} x_{ju} \cdot y_u; \quad (11)$$

$$b_{ii} = c_5 \sum_1^n x_{iu}^2 y_u - c_6 \sum_1^k + \sum_1^n x_{iu}^2 y_u - c_7 \sum_1^n y_u, \quad (12)$$

де $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7$ – коефіцієнти вибірки, значення яких наведені в табл. 2.

Для дослідження роботи геліосушарки в процесі сушіння фруктів основними факторами були вибрані: тепловий потік (x_1 , Вт/м²), температура теплоносія (x_2 , °C), швидкість теплоносія (x_3 , м/с).

Вихідними параметрами були вибрані: y_1 – швидкість сушіння, %/год; y_2 – критична вологість, %; y_3 – коефіцієнт сушіння, год.

У зв'язку з довготривалістю процесу сушіння фруктів у геліосушарці та хаотичною зміною фізичних параметрів навколишнього середовища (сонячної активності, температури та відносної вологості повітря), для полегшення розрахунків і сприйняття числових показників експериментальних досліджень тривалості технологічного процесу сушіння встановлювали у головній одиниці часу – секундах (с), а під час розрахунків переводили в позасистемні одиниці – години (год). Кореляцію адекватності результатів теоретичних і експериментальних досліджень для чистоти перевірки проводили у годинах.

Таблиця 2. Коефіцієнти вибірки

Table 2. Coefficients of sampling

K	П	Коефіцієнти вибірки						
		c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇
1	1	0,298	0,133	0,193	0,231	0,173	0,0156	0,112
2	3	0,156	0,025	0,089	0,145	0,069	0,0057	0,0472
3	3	0,129	0,012	0,042	0,089	0,041	0,0028	0,0259

Таблиця 3. Інтервали та рівні варіювання факторів

Table 3. Intervals and levels of factor variation

Рівень варіювання факторів	Фактори та їх позначення			Фактори в кодованому вигляді		
	теплопродуктивність повітряного колектора Q, Вт	температура теплоносія T _{тн} , °C	швидкість теплоносія v _{тн} , м/с	теплопродуктивність повітряного колектора x ₁ , Вт	температура теплоносія x ₂ , °C	швидкість теплоносія x ₃ , м/с
Нижній	0	20	1	-1	-1	-1
Верхній	460	60	3	+1	+1	+1
Основний	230	40	2	0	0	0
Інтервал варіювання	230	20	1	1	1	1

Таблиця 4. Матриця планування і результати експерименту

Table 4. The matrix of planning and experimental results

№ з/п	Кодовані значення факторів									y_1 , %/ГОД	y_2 , %	y_3 , ГОД	$y_{сер.}$	S
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2					
1	+1	-1	-1	+1	0	0	+1	+1	0	1,15	30,827	0,0505	10,87418	0,00232
2	+1	+1	-1	+1	0	0	+1	+1	0	3,05	30,654	0,0678	10,76503	0,874653
3	+1	-1	-1	-1	0	0	+1	+1	0	1,96	30,791	0,0788	10,87699	0,09301
4	+1	+1	-1	-1	0	0	+1	+1	0	2	31,25	0,0706	10,99503	0,43092
5	-1	-1	+1	0	+1	0	+1	0	+1	3,63	30,44	0,0731	10,84118	-0,72513
6	-1	+1	+1	0	+1	0	+1	0	+1	3,6	30,21	0,0805	10,68251	0,30173
7	-1	-1	+1	0	-1	0	+1	0	+1	1,78	32,85	0,05	11,70197	-0,83199
8	-1	+1	+1	0	-1	0	+1	0	+1	0,85	30,738	0,09798	10,109	0,177643
														$\Delta S_{сер.} = 0,040394$

Якщо врахувати, що рівнем фактору (x_i) називають певне його значення, яке буде фіксуватися під час проведення експерименту, тоді в нашому випадку нижнім і верхнім рівнями будуть три фактори, а саме: теплопродуктивність повітряного колектора – 10 і 460 Вт, температура теплоносія – 20 і 50 °С, швидкість теплоносія – 1 і 2,5 м/с. Рівні та інтервали варіювання перелічених факторів подано у табл. 3.

Оцінка області зміни обраних факторів проведена за результатами залежностей швидкості сушіння (N), критичної вологості ($W_{кр.}$), коефіцієнта сушіння (K), пов'язаних із рівнем сонячної активності та умовами навколишнього середовища. Тому для цього нами було поставлено таку область визначення факторів:

$$10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2;$$

$$20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{тн} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}; 1 \text{ м/с} \leq v_{тн} \leq 2,5 \text{ м/с}.$$

Для отримання математичної моделі технологічного процесу сушіння реалізований багатофакторний експеримент 3³. Складено матрицю планування експерименту для графічних функцій відгуку – швидкості сушіння, критичної вологості, коефіцієнта сушіння в області визначення факторів у кодованих значеннях, які наведені у табл. 4.

Експериментальні дані були оброблені на електронно-обчислювальній машині Acer FSPIRE E1-531 за допомогою програмного забезпечення Microsoft Office Excel 10 та Mathcad 15 з використанням методики латинських квадратів, що дає змогу отримати математичну модель планованого експерименту, обґрунтувати параметри і режими роботи геліосушарки за наведеними далі рівняннями [4; 7; 14]:

Математична модель з трьома змінними для у подається у загальному вигляді лінійної моделі рівняння регресії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2. \quad (13)$$

Математична модель з трьома змінними для швидкості сушіння, критичної вологості та коефіцієнта сушіння розраховується аналогічно y , з урахуванням заміни y_n на натуральні фактори швидкості сушіння N , критичної вологості $W_{кр}$ та коефіцієнта сушіння K :

$$N = 1,249 + 0,162 \cdot Q + 0,293 \cdot T_{тн} + 0,104 \cdot v_{тн} + 0,002 \cdot Q \cdot T_{тн} - 0,029 \cdot Q \cdot v_{тн} + 0,035 \cdot T_{тн} \cdot v_{тн} - 0,017 \cdot Q^2 - 0,112 \cdot T_{тн}^2 - 0,002 \cdot v_{тн}^2. \quad (14)$$

Оцінка адекватності моделі: $F_{розр.} = 0,285$;

$F_{табл.} = 2,5$; $F_{розр.} < F_{табл.}$ – модель адекватна.

$$W_{кр} = 6,269 + 1,142 \cdot Q - 0,084 \cdot T_{тн} + 0,171 \cdot v_{тн} + 0,003 \cdot Q \cdot T_{тн} - 0,138 \cdot Q \cdot v_{тн} - 0,047 \cdot T_{тн} \cdot v_{тн} - 0,083 \cdot Q^2 - 0,142 \cdot T_{тн}^2 - 0,004 \cdot v_{тн}^2. \quad (15)$$

Оцінка адекватності моделі: $F_{розр.} = 0,888$;

$F_{табл.} = 2,5$; $F_{розр.} < F_{табл.}$ – модель адекватна.

$$K = 3,0489 + 0,095 \cdot Q + 0,130 \cdot T_{тн} + 0,050 \cdot v_{тн} + 0,006 \cdot Q \cdot T_{тн} + 0,109 \cdot Q \cdot v_{тн} + 0,073 \cdot T_{тн} \cdot v_{тн} - 0,026 \cdot Q^2 - 0,139 \cdot T_{тн}^2 - 0,003 \cdot v_{тн}^2. \quad (16)$$

Оцінка адекватності моделі: $F_{розр.} = 0,045$;

$F_{табл.} = 2,5$; $F_{розр.} < F_{табл.}$ – модель адекватна.

Програми оцінювали значущість коефіцієнтів за критерієм Стьюдента, а адекватність моделі – за критерієм Фішера [2; 3].

Середні значення показників параметрів оптимізації визначали за реалізацією паралельних спостережень за формулою

$$y_i = \frac{\sum_{j=1}^{m_n} y_{ij}}{m_n}, \quad (17)$$

де y_i – справжнє значення параметра оптимізації; y_{ij} – рядок плану матриці планування; m_n – число паралельних спостережень у кожній точці; j – порядковий номер паралельного дослідження в кожній точці плану матриці.

Середнє квадратичне відхилення дисперсійної похибки отриманого рівняння регресії визначали за формулою

$$S_0^2 = \sum_{i,j,k} x_{(i,j,k)}^2 \dots x_{(\dots)}^2 / N^2. \quad (18)$$

Оцінку дисперсійної адекватності моделі визначали за такою формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum b_i^*{}^2}{N-l}, \quad (19)$$

де N – число дослідів; l – число параметрів у рівнянні.

Довірчим інтервалом коефіцієнта регресії є:

$$|\Delta b_i| = T_{\alpha,n} \cdot S_{bi}, \quad (20)$$

де $T_{\alpha,n}$ – критерій Стюдента; n – число дослідів; S_{bi} – наближене значення похибки відтворюваності.

Оцінка значень коефіцієнтів регресії пов'язана з побудовою довірчих інтервалів, а саме коефіцієнт рівняння регресії значущий тоді, коли його абсолютна величина більша відносно довірчого інтервалу, тобто [4]:

$$|b_i| \geq |\Delta b_i|; \quad (21)$$

$$2,48 \geq 0,023.$$

Адекватність отриманої моделі процесу сушіння перевіряємо за критерієм Фішера F [8]:

$$F_i = \frac{S_{ad}^2}{S_0^2}. \quad (22)$$

Табличне значення $F_{таб}$ прийемо відповідно до отриманих цифрових показників – ступенів відповідності $f_{ad} = N - K^l$ і $f_2 = (m - 1)$ за $Q=5\%$.

Розраховуємо статистичну похибку, отриману за критерієм Стюдента $f=(n-1)$ із степенями відповідності:

$$\sqrt{\lambda_c} = \sqrt{\frac{(\sum b_i^*)^2}{n} - \frac{(n-1)n}{S(n-1)} = \frac{\sum b_i^*}{n} \cdot \sqrt{\frac{n}{3}}};$$

$$\sqrt{\lambda_c} \frac{0,0846}{9} \cdot \frac{9}{0,00013875} = 2,39.$$

Тут середній залишок незначно відрізняється від нуля. Тому визначаємо оцінку дисперсійної похибки S_{ad}^2 за рівнянням

$$S_{ad}^2 = \frac{0,0012498}{8-3} = 0,0002083.$$

Перевіряємо адекватність отриманих рівнянь за критерієм Фішера F щодо рівня значущості 0,05:

$$f_{ad} = N - K^l = 8 - 3 = 5;$$

$$f_2 = (m - 1) = 3 - 1 = 2;$$

$$F_{табл.} = 2,5;$$

$$F_i = \frac{S_{ad}^2}{S_{сп.кв.}} < 2,5; \quad (23)$$

$$F_1 = \frac{0,0002083}{0,00073} = 0,285 < 2,5;$$

Таблиця 5. Дисперсійний аналіз технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці

Table 5. Analysis of variance of the technological process of drying fruit in solar dryer

№ з/п	Фактор	Сума квадратів	Число степеня	Середній квадрат
1	Тепловий потік	$S_{bi}^2 = N^{-1} \sum x_i^2 \dots x_{(\dots)}^2 / N^2$	$n-1$	$S_1/n-1$
2	Температура теплоносія	$S_{bi3}^2 = N^{-1} \sum x_k^2 \dots x_{(\dots)}^2 / N^2$	$n-1$	$S_3/n-1$
3	Швидкість теплоносія	$S_{bi1}^2 = N^{-1} \sum x_j^2 \dots x_{(\dots)}^2 / N^2$	$n-1$	$S_2/n-1$
4	Всього	S_e – різниця	$(n-1)(n-2)$	$S/(n-1)(n-2)$

Таблиця 6. Результати дисперсійного аналізу

Table 6. Results of the analysis of variance

Показник мінливості	Сума квадратів	Число степеневих показників	Середній квадрат
Тепловий потік Q	0,00146	2	0,00073
Температура теплоносія T_{mn}	0,00925	2	0,004628
Швидкість теплоносія v_{mn}	0,00047	2	0,000235
S_e		0	
$S_{всього}$	0,0119693	8	0,001496

$$F_2 = \frac{0,0002083}{0,000235} = 0,886 < 2,5;$$

$$F_3 = \frac{0,0002083}{0,00462} = 0,045 < 2,5.$$

Для оптимізації теплотехнічних параметрів процесу сушіння був вибраний графічний метод з використанням лінійних функцій. Лінійні функції $y_{1...n} = f(x_{1...n}, x_{2...n}, x_{3...n})$ пропонуються для технологічного опису та вибору оптимальних числових значень, обґрунтування параметрів і режимів роботи геліосушарки залежно від теплового потоку (x_1), температури теплоносія (x_2) та швидкості теплоносія (x_3).

Для полегшення пояснення та інтерпретації результатів були використані кодовані значення факторів, які наведені у табл. 3.

Спосіб знаходження залежностей $y_{1...n} = f(x_{1...n}, x_{2...n}, x_{3...n})$ приймаємо у вигляді створення лінійних функцій $y = \sum_{i=1}^n f_i(C_i)$ відносно

значень досліджуваних факторів:

$$N = f(Q, T_{mn}, v_{mn});$$

$$W_{кр} = f(Q, T_{mn}, v_{mn});$$

$$K = f(Q, T_{mn}, v_{mn}).$$

В оцінці області багатофакторного експерименту обґрунтовано режими роботи геліосушарки:

$$10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2;$$

$$20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}; 1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}.$$

На основі залежностей вихідних параметрів від кожного з трьох факторів побудовано графіки, які наведено на рис. 2 – 4.

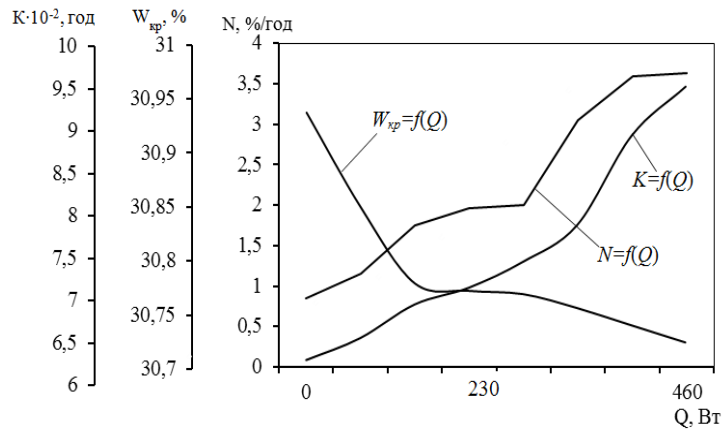


Рис. 2. Залежність коефіцієнта сушіння K , критичної вологості фруктів $W_{кр}$ і швидкості сушіння N від теплопродуктивності повітряного колектора Q

Fig. 2. Dependence of the drying coefficient K , critical humidity of fruit $W_{кр}$ and drying rate N on thermal productivity of air collector Q

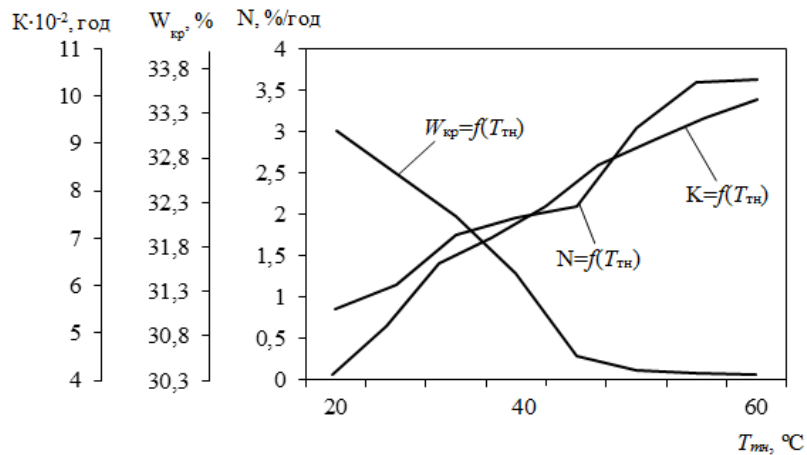


Рис. 3. Залежність коефіцієнта сушіння K , критичної вологості фруктів $W_{кр}$ і швидкості сушіння N фруктів від температури теплоносія T_{mn}

Fig. 3. Dependence of the drying coefficient K , critical humidity of fruit $W_{кр}$ and speed of drying N of fruit on the temperature of coolant T_{mn}

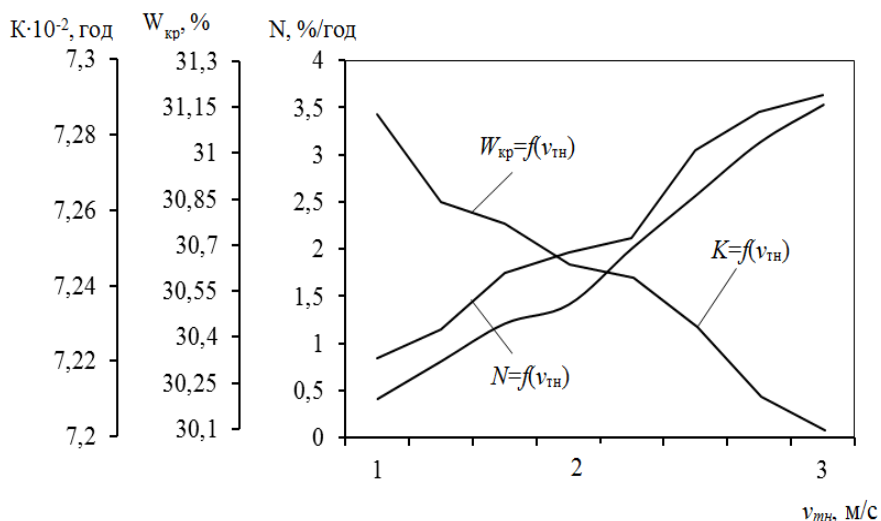


Рис. 4. Залежність коефіцієнта сушіння K , критичної вологості фруктів $W_{кр}$ і швидкості сушіння N від швидкості руху теплоносія $v_{тн}$

Fig. 4. Dependence of the drying coefficient K , critical humidity of fruit $W_{кр}$ and speed of drying N on the speed of movement of coolant $v_{тн}$

Таблиця 7. Результати розрахунково-кількісних експериментальних досліджень тривалості сушіння фруктів у геліосушарці

Table 7. Results of experimental studies of the duration of fruit drying in a solar dryer

№ досліджу	T	τ_1 , год	τ_2 , год	$\tau_{наг.}$, год	N , %/год	$W_{кр.}$, %	K , год
1	87	1,8	84,17	1,03	1,15	30,827	0,0505
2	33	4,63	27,17	1,2	3,05	30,654	0,0678
3	51	3,57	46,41	1,02	1,96	30,791	0,0788
4	50	6,15	42,75	1,1	2	31,25	0,0706
5	27	2,11	23,88	1,01	3,63	30,44	0,0731
6	27	2,31	23,66	1,03	3,6	30,21	0,0805
7	54	2,13	50	1,05	1,78	32,85	0,05
8	118	2,96	114	1,04	0,85	30,738	0,09798

Таблиця 8. Зведені результати дослідження технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці в період 15.07–3.09.2019 р. [14; 16; 17]

Table 8. Integrated results of the study of the technological process of fruit drying in a solar dryer in the period from 15.07 to 3.09.2019 [14; 16; 17]

№ з/п	Тривалість сушіння, год	Тривалість інтервалу сушіння $\tau_{діб.}$, год (доба)	Конфігурація установки		Досліджувана сировина	$Q_{сон.}$, МДж	$Q_{пр.}$, МДж
			ТА *	ПДК **			
1	50	15–17.07	+	+	Яблука	108,5	47,6
2	119	15–21.07	–	–	Груші	–	0
3	74	28–31.07	–	–	Яблука	123,1	44,1
4	77	7–10.08	–	–	Яблука	110,5	39,6
5	50	10–12.08	+	+	Груші	74,8	26,8
6	50	15–17.08	+	+	Сливи	81,3	29,1
7	98	31–3.09	–	–	Сливи	95,8	35,7

Примітки: * – тепловий акумулятор; ** – плоский дзеркальний концентратор

Аналіз отриманих результатів (див. рис. 2 – 4) показує, що максимальні значення швидкості сушіння фруктів N (від 0,85 до 3,63 %/год) досягаються за теплопродуктивності повітряного колектора Q від 10 до 460 Вт, температури теплоносія $T_{\text{тн}}$ від 20 до 60 °С та швидкості циркуляції теплоносія $v_{\text{ми}}$ від 1 до 3 м/с. Критична вологість фруктів $W_{\text{кр}}$ при цьому знижується від 33,8 до 30,1 %, а коефіцієнт сушіння фруктів K збільшується від $5,05 \cdot 10^{-2}$ до $9,798 \cdot 10^{-2}$ год.

Результати дослідження показників сушіння: N – швидкість сушіння фруктів, %/год; $W_{\text{кр}}$ – критична вологість фруктів, %; K – коефіцієнт сушіння фруктів, год – дали змогу розрахувати тривалість процесу (див. табл. 7).

Отже, на основі планованого багатофакторного експерименту обґрунтовано режими сушіння фруктів у геліосушарці, які показують, що максимальні значення швидкості сушіння фруктів N (від 0,85 до 3,63 %/год) досягаються за теплопродуктивності повітряного колектора Q від 10 до 460 Вт, температури теплоносія $T_{\text{тн}}$ від 20 до 60 °С та швидкості циркуляції теплоносія $v_{\text{ми}}$ від 1 до 3 м/с. Критична вологість фруктів $W_{\text{кр}}$ при цьому знижується від 33,8 до 30,1 %, коефіцієнт сушіння фруктів K збільшується від $5,05 \cdot 10^{-2}$ до $9,798 \cdot 10^{-2}$ год, а тривалість сушіння становить $\tau = 27 \div 118$ год.

Таким чином, отримані залежності мають зростаючий або спадний характер, що відповідає фізичній сутності процесу сушіння фруктів у геліосушарці.

Крім того, натурні випробування геліосушарки з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором проводили в індивідуальному фермерському господарстві ФГ «Зоря», що розташоване у м. Корці Рівненської області (Україна), у літньо-осінній період з 16 липня до 9 жовтня 2019 р.

Детальний опис результатів дослідження технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці та аналіз впливу режимних параметрів на енергетичну ефективність установки з різною конфігурацією і тривалість процесу сушіння наведено в роботах [14; 16; 17]. Зокрема, дослідили процес роботи енергетичного блока геліосушарки з різною конфігурацією, а саме у комплекті з дзеркальним концентратором і тепловим акумулятором та без їхнього використання і в режимі природної циклічності. Результати виробничих випробувань геліосушарки зведено у табл. 8.

У період випробувань геліосушарки з 15.07.2019 р. до 17.07.2019 р. середньоденні фізичні параметри навколишнього середовища

були такими [16]:

1. Температура повітря $T_{\text{нс}} - 16...30$ °С.
2. Відносна вологість повітря $\varphi_{\text{нс}} - 26...86,8$ %.
3. Енергетична освітленість $E - 100...800$ Вт/м² для площі поглинальної поверхні $S_{\text{пк}} = 1,5$ м².
4. Теплотехнічні параметри теплоносія (повітря), що надходив до сушильної камери, становили: температура в денний час (з 8⁰⁰ до 21⁰⁰ год.) $T_{\text{тн}} - 20...60$ °С, у нічний час (з 22⁰⁰ до 7⁰⁰ год.) $T_{\text{тн}} - 30...20$ °С.
5. Швидкість циркуляції теплоносія (повітря) $v_{\text{тн}} - 1...3$ м/с.
6. Відносна вологість теплоносія (повітря) $\varphi_{\text{тн}} - 9,8...86$ %.
7. Температура акумулятора $T_{\text{та}}$ в денний час (з 8⁰⁰ до 21⁰⁰ год.) становила 30,5...45,6 °С, у нічний час (з 22⁰⁰ до 7⁰⁰ год.) – 45,6...20,9 °С.

В експериментальних дослідженнях температуру вимірювали у градусах Цельсія (°С), а під час розрахунків переводили в одиниці термодинамічної температури (К). Кореляцію адекватності результатів теоретичних і експериментальних досліджень для чистоти перевірки проводили у градусах Цельсія (°С).

Таким чином, структура розподілу сонячної енергії, що надходить на повітряний колектор, свідчить про те, що геліосушарка за один цикл сушіння використовувала сонячну енергію в межах від 100 до 800 Вт/м². Це дало змогу одержати теплову енергію в межах 55669,1 кДж, з якої теплоносієм поглинув 27856 кДж і затратив 23987 кДж на нагрівання та випаровування вологи з продукту. Надлишок теплової енергії було накопичено в акумуляторі в межах 2633,1 кДж.

На завершення, зазначимо, що основним недоліком геліосушарки є контроль за некерованими параметрами процесу сушіння, який зводиться до регулювання вологості та вологовмісту висушуваного матеріалу в бік зменшення їхніх значень, а також регулювання температури. Температура, вологість та вологовміст теплоносія у геліосушарці коливаються в досить широкому діапазоні залежно від погодних умов, часу доби, конфігурації енергетичного блока сушарки, інтенсивності сонячної енергії. Отож, тривалість сушіння фруктів не можна розрахувати або змодельовати за допомогою імітаційних моделей під час комп'ютерного моделювання, а необхідно процес сушіння фруктів у геліосушарці контролювати за кінетичними і динамічними параметрами процесу, а саме за зміною маси m , вологості W і вологовмісту U висушуваного матеріалу та отриманою якістю сировини (див. табл. 7 і 8). Оскільки неможливо контролювати хаотичні

фізичні параметри навколишнього середовища, то можна тільки підлаштуватися під них, а саме інтенсифікувати процес сушіння фруктів з використанням максимальної кількості сонячної енергії за допомогою об'єднання в єдиний енергетичний блок у геліосушарці повітряного колектора, теплового акумулятора, сушильної камери та плоского дзеркального концентратора.

Висновки

1. Застосування сонячної енергії для сушіння фруктів є прийнятним для широти розташування Рівненської області, яка має середньорічну потужність сонячного випромінювання порядку $3,41 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ за світловий день. Це дозволяє з 1 м^2 площі повітряного колектора отримати від $1,5$ до $2,3 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ енергії за добу.

2. Рівняння регресії в декодованому вигляді дає змогу розрахунковим способом проаналізувати процес сушіння фруктів у геліосушарці при обробці отриманих числових значень розглянутих факторів, а саме теплотехнічних та технологічних параметрів і режимів процесу сушіння фруктів у геліосушарці, що лежать у досліджуваній області експерименту: $10 \text{ Вт}/\text{м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт}/\text{м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{\text{тн}} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м}/\text{с} \leq v_{\text{тн}} \leq 2,5 \text{ м}/\text{с}$.

3. На основі планованого багатфакторного експерименту обґрунтовано режими сушіння фруктів у геліосушарці, зокрема максимальні значення швидкості сушіння фруктів N (від $0,85$ до $3,63 \text{ } \%/ \text{год}$) досягаються за теплопродуктивності повітряного колектора Q від 10 до 460 Вт , температури теплоносія $T_{\text{тн}}$ від 20 до $60 \text{ }^\circ\text{C}$ та швидкості циркуляції теплоносія $v_{\text{тн}}$ від 1 до $3 \text{ м}/\text{с}$. Критична вологість фруктів $W_{\text{кр}}$ при цьому знижується від $33,8$ до $30,1 \text{ } \%$, коефіцієнт сушіння фруктів K збільшується від $5,05 \cdot 10^{-2}$ до $9,798 \cdot 10^{-2} \text{ год}$, а тривалість сушіння τ становить $27 \dots 118$ годин.

4. На теплопродуктивність геліосушарки $Q = 117 \dots 480 \text{ Вт}$ суттєво впливає енергетична освітленість E^{max} , посилена дзеркальним концентратором, яка становить у ранковий період (з 7^{00} до 10^{00} год.) від 456 до $965 \text{ Вт}/\text{м}^2$ та вечірній період (з 17^{00} до 20^{00} год.) – від 734 до $223 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

5. Одержані результати можуть бути використані для розрахунку собівартості конвективного сушіння фруктів у геліосушарці. Перспективним напрямом подальших досліджень є оптимізація перехідної вологості висушуваного матеріалу під час конвективного сушіння фруктів у геліосушарці.

Бібліографічний список

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва: Наука, 1976. 274 с.
2. Бачурская Л. Д., Гуляев В. Н. Пищевые концентраты. Москва: Пищ. пром-сть, 1976. 335 с.
3. Веденяпин Г. В. Общая методика исследования и обработки опытных данных. Москва: Колос, 1973. 200 с.
4. Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента. Минск: Изд-во БГУ им. В. И. Ленина, 1982. 302 с.
5. Лыков А. В. Теория сушки. Москва: Энергия, 1968. 472 с.
6. Лыков А. В. Теплообмен: справочник. Москва: Энергия, 1970. 480 с.
7. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рощин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Ленинград: Колос, 1980. 258 с.
8. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. Ленинград: Энергия, 1978. 262 с.
9. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента. Москва: Наука, 1971. 378 с.
10. Финни Д. В. Введение в теорию оптимального эксперимента. Москва: Наука, 1970. 243 с.
11. Azimi A., Tavakoli T., Khademhosseini H. Experimental Study on Eggplant Drying by an Indirect Solar Dryer and Open Sun Drying. *Iranica Journal of Energy & Environment*. 2012. Vol. 3, issue 4. P. 347–353.
12. Experimental performance and modeling of a greenhouse solar dryer for drying macadamia nuts / S. Janjai, C. Phusampao, W. Nilnont, P. Pankaew. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2014. Vol. 5. P. 1155 – 1161.
13. Kaveh M., Amiri Chayjan R., Esna–Ashari M. Thermal and physical properties modelling of terebinth fruit (*Pistacia atlantica* L.) under solar drying. *Research in Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 61, issue 4. P. 150–161.
14. Korobka S., Babych M. Substantiation of the constructive–technological parameters of a solar fruit dryer. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1, issue 8 (85). P. 13–19.
15. Modeling of the motion of free convective drying agent in plastic helio dryer / Z. M. Khazimov, G. C. Bora, K. M. Khazimov, M. Z. Khazimov. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2014. Vol. 23, issue 4. P. 306–315.
16. Results of research into technological process of fruit drying in the solar / S. Korobka, M. Babych, R. Krygul, A. Zdobytskyj. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 1/8(91) P. 64–73.
17. Substantiation of economic efficiency of using a solar dryer under conditions of personal peasant farms / M. Babych, S. Korobka, R. Skrynkovskyy, S. Korobka, R. Krygul. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6, issue 8 (84). P. 41–47.
18. Thin layer drying model for simulating the drying of Tilapia fish (*Oreochromis niloticus*) in a solar tunnel dryer / G. M. Kituu et al. *Journal of Food Engineering*. 2010. Vol. 98, issue 3. P. 325 – 331.

Стаття надійшла 20.09.2019

ENERGY SUPPLY FOR THE PROCESSES OF GREENHOUSE BUSINESS WITH APPLICATION OF RENEWABLE SOURCES OF ENERGY

Valerii Syrotyuk, PhD, Serhii Syrotyuk, PhD, Vadym Ptashnyk, PhD
*Lviv National Agrarian University,
Volodymyra Velykoho str., 1, Dubliany, Zhovkva district, Lviv region, Ukraine,
e-mail: ssyr@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.056>

Syrotyuk V., Syrotyuk S., Ptashnyk V. Energy supply for the processes of greenhouse business with application of renewable sources of energy

The article stresses that photosynthesis is a basis for the technological process of covered soil constructions used for growing of vegetables and flowers. The process is revealed in transformation of carbon dioxide into a marketable organic substance with oxygen release under the impact of light. Main factors of the production environment were analysed. To perform tasks of the technological process effectively, it is necessary to secure the best-possible levels of such principal parameters as air temperature in the greenhouse; temperature of the air outside (control); temperature of soil in the greenhouse; air humidity in the greenhouse; soil humidity in the greenhouse; concentration of carbon dioxide CO₂ in the greenhouse; concentration of carbon monoxide CO in the greenhouse; level of lighting in the greenhouse; air velocity in the greenhouse. In addition, one has to ensure the continuous monitoring of following aspects: type and the total level of radiation; airspeed outside the greenhouse (control). The work notes that in the structure of production costs of a covered soil construction, a considerable share is taken by costs for energy sources. Hence, the system of energy supply for greenhouse business should be developed with application of renewable sources of energy referring to the approved structural scheme. In particular, it has been shown that the main renewable energy sources suitable for use in a greenhouse are wind and solar. An obligatory element of such energy system includes an automatic system of control for the parameters of greenhouse microclimate. Such solution will reduce costs for energy sources and improve ecological compatibility of production. It is also proved that the optimization of the structural scheme of the system of control and management of the microclimate parameters increases the level of reliability of the developed system, allows reducing the costs of its development and maintenance.

Key words: greenhouse, renewable energy sources, energy saving, automation, microclimate control system.

Сиротюк В., Сиротюк С., Пташник В. Енергозабезпечення процесів тепличного виробництва з використанням відновлюваних джерел енергії

У роботі відзначено, що основою технологічного процесу при вирощуванні овочів та квітів у закритому ґрунті є фотосинтез, який передбачає перетворення вуглекислого газу під впливом світла у товарну органічну речовину з вивільненням кисню.

Проаналізовано основні фактори виробничого середовища та показано, що для ефективної реалізації технологічних процесів у теплиці необхідно забезпечити оптимальний рівень таких основних параметрів: температура повітря у теплиці; температура ґрунту у теплиці; вологість повітря у теплиці; вологість ґрунту у теплиці; концентрація вуглекислого газу CO₂ у теплиці; концентрація чадного газу СО у теплиці; рівень освітленості у теплиці; швидкість руху повітря у теплиці. Крім того, необхідно забезпечити неперервний контроль за: видом та сумарним рівнем опромінення; швидкістю руху повітряного потоку за межами теплиці, температурою зовнішнього повітря.

Зазначено, що значну частку в структурі собівартості продукції, отриманої в спорудах закритого ґрунту, становлять витрати на енергоносії. Тому систему енергозабезпечення тепличного господарства доцільно будувати з використанням відновлюваних джерел енергії, у роботі розроблено та обґрунтовано відповідну структурну схему. Зокрема, показано, що основними відновлюваними джерелами енергії, придатними для використання в тепличному господарстві, є енергія вітру та сонця. Невід'ємною частиною такої енергетичної системи повинна бути автоматична система підтримання параметрів мікроклімату теплиці. Це забезпечить зниження витрат на енергоносії та підвищить екологічність виробництва. Також доведено, що оптимізація структурної схеми системи контролю та управління параметрами мікроклімату підвищує рівень надійності розробленої системи, дозволяє скоротити витрати на її розгортання та обслуговування.

Ключові слова: теплиці, джерела відновлюваної енергії, енергозбереження, автоматизація, системи управління мікрокліматом.

Problem setting. Climatic characteristics of Ukraine do not allow producing of vegetables a year round. The problem of extension of the period of employment of land resources during a year is solved by applying the technologies of greenhouse production with use of covered soil constructions.

In Ukraine, the structure of greenhouse production is developed with preference to vegetable growing, which constitutes 79 % of the total output of gross products. Cultivation of flowers and other plants occupies 19 and 2 % respectively. Greenhouses are mainly used for cultivation of such crops as tomatoes (their area occupies 1 thousand ha), cucumbers (1.4 thousand ha) and roses (above 60 ha) [9].

Cropping areas of covered soil vegetables have been lately increased from 5.7 to 6.36 thousand ha, while gross production has increased from 546.7 to 555.7 thousand tons. Among the total territory intended for vegetable growing, in 2018, the occupied area took 439.06 thousand ha of field, which supplied the yield of 9440.2 thousand tons of products. In the structure of cropping areas in 2018, open-ground vegetable growing occupied 98.56 % comparing to 1.44 % of the vegetable growing on covered soil. Moreover, yield on the open ground constituted 94.11% of products, while on the covered soil, it made 5.89 % [8].

Analysis of recent research and publications.

The promising plans of greenhouse business development expect twice expansion of the area under constructions of covered soil until 2020 [6].

Constructions of covered soil are divided into heat-insulated soil, hotbeds and greenhouses [5]. The first is used for growing of seedlings and early vegetables, the second – for growing of seedlings for open-ground cultivation and early vegetables, while greenhouses, as the best technologically equipped kind of covered soil constructions – for industrial year-round growing of seedlings, vegetables and flowers.

A greenhouse is a construction of covered soil. Its principal task is to support the best-possible conditions for controlled photosynthesis (Fig. 1), i.e. transformation of carbon dioxide into a marketable organic substance with oxygen release under the impact of light.

Greenhouses are classified according to the following characteristics [2]:

- according to the functional use – into the greenhouses for vegetables and seedlings (production of seedlings for open ground), flowers (glass houses), selection greenhouses;

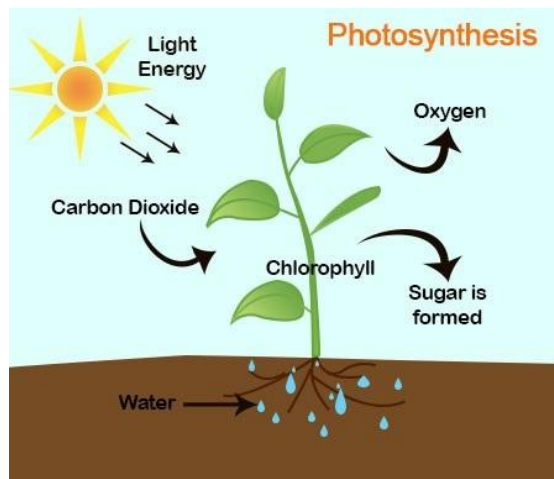


Fig. 1. The process of photosynthesis [7]

Рис. 1. Процес фотосинтезу [7]

- according to the technology of plant growing – into soil greenhouses (growing of agricultural crops on soil mixtures) and hydroponic greenhouses (growing of agricultural crops on artificial substrates in ponds and shelves);

- according to exploitation period – into year-round greenhouses (with artificial heating), spring-summer-autumn greenhouses (with heating by solar radiation and additional artificial heating in case of emergency);

- according to the planned and constructive decision – into shed greenhouses (one-run) and blocked greenhouses (multi-run);

- according to the type of construction envelope – into glass greenhouses, membrane greenhouses, and greenhouses of light-transparent synthetic materials.

A considerable share of exploitation costs is taken by an extremely high level of energy consumption of the technological processes in the covered soil constructions, particularly in winter greenhouses. On average, production of 1 kg of a vegetable product consumes almost 160–180 MJ of thermal and 1.2–2.3 kW·h of electric energy. According to different sources, in the structure of the costs of production of the covered soil products, energy sources take above 50 % [1; 3; 4; 8; 16].

Energy costs can be reduced by 20–30 % by complete automation and upgrading of the quality of regulation of the operating parameters of acting constructions of covered soil [8].

In case operating parameters exceed the limits of standard operating procedure, a crucial effect is observed in yield capacity and marketable quality of products. Hence, it is necessary to secure a reliable and fail-safe operation of the technological and energy

equipment in order to keep operating parameters within the technological tolerance.

Main results. Microclimate parameters in the construction of covered soil are regulated by the State Building Standards of Ukraine “Buildings and constructions. Greenhouses and hotbeds” DBN B.2.2-2-95. They are primarily focused on support of safe conditions for permanently working personnel of the constructions. Moreover, correction of the microclimate parameters is performed according to the intended use, kind and type of commodities, level of intensity of the process of their growing and other factors. Such parameters include temperature of air and soil; share of carbon dioxide in the air; relative humidity of the air and soil; and air velocity.

Hence, automatic control and management is done referring to such parameters of microclimate, as [14; 15]:

- air temperature in the greenhouse;
- air temperature outside (control);
- soil temperature in the greenhouse;
- air humidity in the greenhouse;
- soil humidity in the greenhouse;
- concentration of carbon dioxide CO₂ in the greenhouse;
- concentration of carbon monoxide CO in the greenhouse;
- level of lighting in the greenhouse;
- air velocity in the greenhouse;
- type and the total level of radiation;
- airspeed outside the greenhouse (control).

The mentioned parameters should be supported by the automatic system referring to the regulatory documents [10–13].

Thermal conditions of cultivation constructions are maintained by automatic systems of heating and ventilation. The conditions are determined by capacity of the source of heat, as well as constructive particularities of the constructions. Accuracy of maintenance of the set temperature should be secured within ± 1 °C. Besides, the set temperature should agree with the level of lighting referring to physiological peculiarities of plants’ living. Systems of greenhouse heating expect heating of soil and air.

Water regime is maintained by keeping of the required humidity of air and soil by means of different irrigation systems (irrigation above the surface, under the soil, drip system). Irrigation should not violate thermal conditions in the construction, and thus, the water used for irrigation should be kept at the level of the temperature of air and soil (within 20–25 °C).

Gas conditions within the volume of a covered soil construction expect control and maintenance of

the concentration of carbon dioxide at the level of 0.1–0.35 %. Regulation of the concentration is performed at the level of lighting above 5 klx. The share of carbon dioxide in the greenhouse can be increased by burning of natural gas in specialized combustion installations or by exhausted gas of boiler installations. Initiation of the scheme of CO₂ supply is automatically blocked under reduction of the level of lighting, in case of opened fanlights and increased relative humidity in the greenhouse.

Intensification of the processes of plants’ living requires air velocity at the level of 0.15 m/s. Natural and technical ventilation is used in greenhouses to dispose the excess of heat from solar radiation, as well as to season seedlings.

Regulated artificial lighting is used for growing of seedlings and in selection constructions.

One of the ways to maintain the necessary parameters of microclimate in a greenhouse expects use of an internal combustion engine in the system of energy supply. The engine runs on natural gas or biogas in a cogeneration mode. In such system, operation of the engine, which is loaded on an electric generator, will produce water vapour, carbon dioxide, heat and electric energy.

The electric energy can be used for lighting, heating of soil and air, as well as serve as activator of mechanisms. The carbon dioxide can be used for nutrition of plants.

Considering the fact that in case of a fault situation the engine can generate carbon monoxide, it is necessary to plan an appropriate primary transformer of CO in the system of control.

As it has been mentioned above, in the structure of prime costs of crop production on covered soil, expenditures for energy sources take from 20 to 60 %, depending on the technology of growing, technical equipment, and level of production automation. Hence, to reduce the costs of crop growing on covered soil and improve the level of ecological qualities of production, it is reasonable to use renewable sources of energy, particularly energy of the Sun and wind, heat of the environment and subsoil, etc.

In particular, to support thermal processes of warming of the water for irrigation, heating of soil and air, it is possible to use solar thermal installations, thermal pumps, etc. Supply of the processes of greenhouse production with electric energy can be secured by application of wind electric and photoelectric installations.

Under such conditions, structural scheme of the system of energy supply is presented at the following picture (Fig. 2).

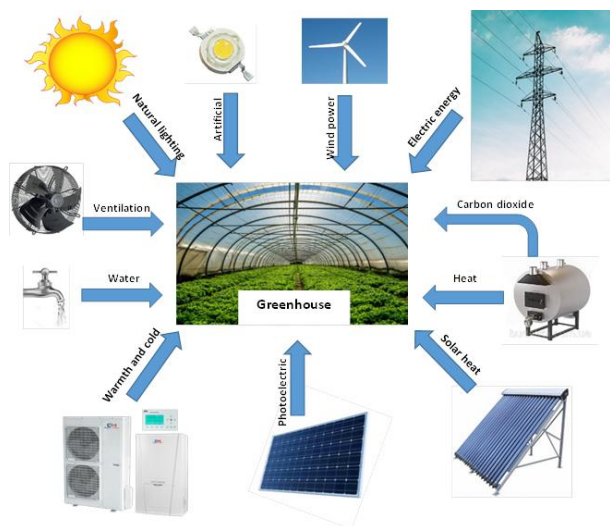


Fig. 2. Structural scheme of the system of energy supply for the processes of greenhouse production

Рис. 2. Структурна схема системи енергопостачання тепличного господарства

Conclusions. Intensity of plant photosynthesis, and thus, efficiency of the covered soil constructions, considerably depends on an optimal level of microclimate parameters, which can be secured by application of automatic systems of control for the processes. A peculiarity of such system of control is not only to support a regulated microclimate in a covered soil construction, but also to manage energy flows from different sources, including renewable ones, contributing to improvement of economic and energy efficiency of the system.

Considering the tendencies of farming development in Ukraine and its limited financial resources, the developed system of control for the microclimate and energy flows in the constructions of covered soil is capable to secure profitability, primarily under conditions of small-scale production.

References

1. Avdzhyan, N., Kirichenko, A., Skorohod, A. (2016). Sozdanie neobhodimogo mikroklimata v teplitsah za schet ispolzovaniya vozobnovlyaemykh istochnikov energii. *Aktualnyie problemy energetiki APK: materialy VII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Saratov: TseSAin.*
2. Bolotskih, N. (2015). Zarubezhnyie tehnologii infrakrasnogo obogreva teplits. *Naukovyi visnyk budivnytstva*, 1(79), 150–158.
3. Nadirov, N., Nekrasov, V., Shevchenko, S., Solodova, E., Suhanberdieva, D. (2016). Vozobnovlyаемaya energetika v teplichnykh tehnologiyah. *Doklady Natsionalnoy akademii nauk Respubliki Kazahstan*, 2, 137–144.

4. Ivanenko, V. (2011). Osoblyvosti formuvannia enerhovytrat na vyrobnytstvo produktii ovochivnytstva zakrytoho gruntu. *Naukovyi visnyk LNUVMBT im. Gzhytskoho*, 2(48), 71–78.

5. Martynenko, I. (1995). *Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv silskohospodarskoho vyrobnytstva*. Kyiv: Urozhai.

6. Nadirov, N., Nekrasov, V., Tanirbergenova, A., Yusupova, M. (2015). Teplitsyi – novyye resheniya v proizvodstve produktov pitaniya. *Agrarnyyi sektor*, 4, 89–93.

7. Nekrasov, V. G., Shevchenko, S. A., Yusupova, M. (2015). *Energetika teplits (teplichnyie tehnologii)*. Berlin: LAMBERT Academic Publishing.

8. State Statistics Service of Ukraine. (2018). *Agrarian sector: statistical notes*. Retrieved from www.ukrstat.gov.ua.

9. Tiravskiy, V. (2011). Parnikovyyiyeffekt. *Status*, 22(192). Retrieved from <http://statuspress.com.ua/nisha/parnikovyy-effekt-2.html>.

10. Anushree, M. K., Krishna, R. (2018). A smart farming system using Arduino based technology. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 4(4), 850–856.

11. Shankaraiah, D., Prajwal, G., Hemanth Kumar, B. S., Shweta B., Nayana, R. (2019). Automated green house. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 5(3), 1831–1834.

12. Eddahhak, A., Lachhab, A., Ezzine, L., Bouchikhi, B. (2007). Performance evaluation of a developing greenhouse climate control with a computer system. *AMSE Journal Modelling*, 68(1), 53–64.

13. Ganesan, K., Walele, U., Hambire, N., Choughule, P., Oommen, D. (2018). Raspberry-Pi Based Automated Greenhouse. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(3), 2346–2350.

14. Shamshiri, R. (2007). *Principles of Greenhouse Control Engineering. Part 1: Theories & Concepts*. ITMA, UPM.

15. Somvanshi, S., Pandey, D., Asthana, P. (2017). Monitoring System of a Greenhouse. *International Journals of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 7(6), 847–851.

16. Woodenergy. (2019). Enerhetychnyi monitorynh ta ekonomichna otsinka teplychnykh hospodarstv. Retrieved from https://green-house.at.ua/publ/energetichnij_monitoring_ta_ekonomichna_ocinka_teplichnykh_gospodarstv/1-1-0-4.

Бібліографічний список

1. Авджан Н. С., Кириченко, А. С., Скороход, А. А. Создание необходимого микроклимата в теплицах за счет использования возобновляемых источников энергии. *Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VII Международ. науч.-практ. конф. Саратов: ЦеСАин, 2016. С. 90.*

2. Болотских Н. Зарубежные технологии инфракрасного обогрева теплиц. *Науковий вісник будівництва*. 2011. № 1(79). С. 150–158.

3. Возобновляемая энергетика в тепличных технологиях / Н. Надиров и др. *Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан*. 2016. № 2. С. 137–144.
4. Іваненко В. Ф. Особливості формування енерговитрат на виробництво продукції овочівництва закритого ґрунту. *Науковий вісник ЛНУВМБТ ім. Гжицького*. 2011. № 2(48). С. 71–78.
5. Мартиненко І. І. Автоматизація технологічних процесів сільськогосподарського виробництва. Київ: Урожай, 1995. 224 с.
6. Надиров Н., Некрасов В., Танирбергенова А., Юсупова М. Теплицы – новые решения в производстве продуктов питания. *Аграрный сектор*. 2011. № 4. С. 89–93.
7. Некрасов В., Шевченко С., Юсупова М. *Энергетика теплиц (тепличные технологии)*. Берлин: LAMBERT Academic Publishing, 2015. 138 с.
8. Статистичні нотатки. Аграрний сектор. *Державна служба статистики України*. 2018. URL: www.ukrstat.gov.ua (дата звернення: 25.09.2019).
9. Тиравский В. Парниковый эффект. *Статус*. 2011. № 22(192). URL: <http://statuspress.com.ua/nisha/parnikovuj-effekt-2.html> (дата обращения: 25.09.2019).
10. Anushree M. K., Krishna R. A smart farming system using Arduino based technology. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*. 2018. Vol. 4(4). P. 850–856.
11. Automated green house / D. Shankaraiah et al. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*. 2019. Vol. 5, issue. 3. P. 1831–1834.
12. Eddahhak A., Lachhab A., Ezzine L., Bouchikhi B. Performance evaluation of a developing greenhouse climate control with a computer system. *AMSE Journal Modelling*. 2007. Vol. 68(1). P. 53–64.
13. Raspberry-Pi Based Automated Greenhouse / K. Ganesan et al. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2018. Vol. 5(3). P. 2346–2350.
14. Shamshiri R. *Principles of Greenhouse Control Engineering. Part 1: Theories & Concepts*. ITMA, UPM, 2007. 86 p.
15. Somvanshi S., Pandey D., Asthana P. Monitoring System of a Greenhouse. *International Journals of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. 2017. Vol. 7(6). P. 847–851.
16. Woodenergy. Економічний моніторинг та економічна оцінка тепличних господарств. 2011. URL: https://green-house.at.ua/publ/energetichnij_monitoring_ta_ekonomichna_ocinka_teplichnikh_gospodarstv/1-1-0-4 (дата звернення: 25.09.2019).

Стаття надійшла 05.10.2019

Розділ 4

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

УДК 681.586.773(035)

ПОЛІПШЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОПРИВОДА В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ

Андрій Видмиш, к. т. н., Андрій Штуць, здобувач
*Вінницький національний аграрний університет,
вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна,
e-mail: shtuts1989@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.061>

Видмиш А., Штуць А. Поліпшення характеристик перетворювача електропривода в перехідних режимах

Вирішення проблем енергозбереження та забезпечення безпечних режимів роботи двигуна постійного струму за допомогою контролю оптимального режиму в імпульсному електроприводі є актуальним завданням сучасної електроенергетики.

Сьогодні в промисловості, а особливо на електротранспорті, застосовуються електроприводи з електродвигунами постійного струму. Спектр застосування електроприводів постійного струму з двигунами послідовного збудження досить широкий, зокрема їх застосовують як тяговий електропривод рухомого складу міського та залізничного транспорту. Це зумовлено тим, що зміна моменту навантаження для таких механізмів добре узгоджується з електромеханічною характеристикою двигунів послідовного збудження.

Істотним чинником підвищення рентабельності роботи електротранспорту загалом може бути заміна існуючого тягового електропривода на більш сучасні види.

Розроблено імітаційні моделі, які дають змогу досліджувати електромеханічні процеси в серійному двигуні постійного струму.

Введення в схему імпульсного регулятора діода, який шунтує обмотку збудження, дає змогу знизити швидкість затухання струму в цій обмотці.

Запропонована модернізація, що полягає у введенні в схему діодів, дозволяє використовувати режим електродинамічного гальмування при самозбудженні електродвигуна.

Запропоноване схемне рішення із застосуванням накопичувача енергії допоможе уникнути застосування додаткових незалежних джерел струму та спростити технічну реалізацію і зменшити витрати.

Введення додаткових діодів, накопичувача енергії, допоміжного і баластного резисторів дає змогу обмежувати пусковий струм та забезпечити безпечні режими експлуатації елементів електропривода. Також напруга на елементах перетворювача контролюється додатковим входом блока керування та не перевищує максимально допустимих значень, що забезпечує безпечний режим роботи всіх елементів мережі.

Ключові слова: мостовий перетворювач, електропривод, керування двигуном постійного струму, перехідний режим.

Vidmysh A., Stuts A. Improvement of characteristics of transmission converter in transition modes

Solving energy saving problems and ensuring safe modes of operation of the DC motor by controlling the optimum mode in a pulsed electric drive.

At present, in the industry, and especially in electric transport, electric motors with direct electric motors are used. The range of application of direct current motors with series excitation motors is rather wide traction electric drive of rolling stock of urban and railway transport. This is due to the fact that the change in the load moment for these mechanisms is in good agreement with the electromechanical characteristics of the series excitation motors.

A significant factor in increasing the profitability of electric transport in general may be the replacement of an existing traction drive with more modern types.

Simulation models have been developed that allow us to investigate electromechanical processes in a serial DC motor.

Introduction to the circuit of a pulsed regulator diode, which shunts the excitation winding, reduces the rate of attenuation of the current in this winding.

The proposed modernization, which consists in the introduction of diodes in the scheme, allows to use the mode of electrodynamic braking during self-excitation of the electric motor.

The proposed circuit design with the use of energy storage avoids the use of additional independent current sources and simplifies the technical implementation and reduces costs.

The introduction of additional diodes, energy storage, auxiliary and ballast resistors allow to limit the starting current and provide safe operating modes of the elements of the actuator. Also, the voltage on the converter elements is controlled by the additional input of the control unit and does not exceed the maximum permissible values, which ensures safe operation of all network elements.

Key words: bridge converter, electric drive, DC motor control, transient mode.

Постановка проблеми. Сучасний електро-транспорт посідає важливе місце в транспортній інфраструктурі міст. Основним рушієм електро-рухомого складу є електропривод. Як приводні двигуни найчастіше використовують тягові двигуни постійного струму.

Але використання таких двигунів часто супроводжується значними втратами енергії в пускових та гальмівних режимах, а також під час змін навантажень двигуна. Це призводить до значних втрат електроенергії, що, своєю чергою, значно підвищує вартість використання електроприводів. Поліпшення керованості електроприводів дає змогу зменшити електричні втрати та спрямувати рекуперовану енергію для використання іншими споживачами і таким чином підвищити ефективність усієї системи.

На сучасному етапі розвитку електротехніки та електромеханіки питання щодо керування двигунами електропривода не вирішено повною мірою. Зокрема, недоліком низки перетворювачів, які використовують для живлення електроприводів, є відсутність обмеження пускового струму, що створює небезпечні режими для ключів і двигуна, а також неможливість рекуперації енергії за відсутності інших споживачів під час роботи в колі вторинної мережі живлення. Це призводить до створення небезпечних режимів елементів електропривода і збільшення втрат електроенергії у двигуні. Тому вирішення проблеми енергоощадності та забезпечення безпечних режимів роботи тягового двигуна постійного струму за допомогою контролю оптимального режиму імпульсного електропривода є актуальною задачею сучасної електроенергетики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі перетворювачі, що розв'язують вказану задачу, мають вузьке спрямування та часто не забезпечують технологічних вимог [1–3]. Тобто вирішення однієї проблеми призводить до виникнення низки інших, що унеможлиблює використання такого перетворювача в інших галузях.

Постановка завдання. У більшості приводів електродвигуни переважно працюють у перехідних режимах (наприклад, в електротранспорті: пуск, гальмування, збільшення та зменшення швидкості), що становить 20–50 % загального часу роботи. З аналізу даних КП

«Вінницька транспортна компанія» для міста Вінниці, де відстані між зупинками невеликі (50–300 м), часто електропривод працює тільки в перехідних режимах. У таких режимах перенавантажується як двигун, так і перетворювач електропривода. Тому метою нашої роботи є розробка мостового перетворювача для контролю роботи електропривода, що дасть змогу забезпечити зменшення втрат енергії та безпечність роботи як у нормальних, так і перехідних режимах.

Виклад основного матеріалу. Відомі системи перетворювачів, в яких за рахунок імпульсного керування є можливість реалізувати електродинамічне або рекуперативне гальмування [1], але проблема зменшення втрат так і залишається недостатньо вирішеною. Поставлена задача розв'язується тим, що до складу перетворювача для керування двигуном постійного струму вводять додаткові елементи: діоди, накопичувач енергії, баластний резистор (рис. 1).

На рис. 1 наведена структурна схема перетворювача для керування двигуном постійного струму, в якій використано такі позначення: ЗФ – згладжувальний фільтр, МІ – мостовий інвертор, ДПС – двигун постійного струму, БК – блок керування, НЕ – накопичувач енергії, ЕК – електронний ключ.

Робота пристрою побудована таким чином. Подача живлення переводить пристрій у підготовчий стан. Усі транзистори мостового інвертора і електронний ключ перебувають у замкненому стані. Ємності накопичувача енергії заряджуються через допоміжний резистор до напруги U_C , близької до напруги живлення перетворювача E . Якщо знехтувати часом встановлення напруги на виході згладжувального фільтра, то час підготовки T_0 в основному визначається часом заряду реактивності накопичувача енергії. При ємнісній реалізації

$$T_0 \approx 3R_D * C_{HE}, \quad (1)$$

R_D – опір допоміжного резистору; C_{HE} – ємність накопичувача енергії.

Напруга на виході накопичувача енергії контролюється за додатковим входом блока керування і, коли вона досягає рівня, близького до рівня напруги живлення E , формується сигнал, який дозволяє блоку керування перейти до стану пуску.

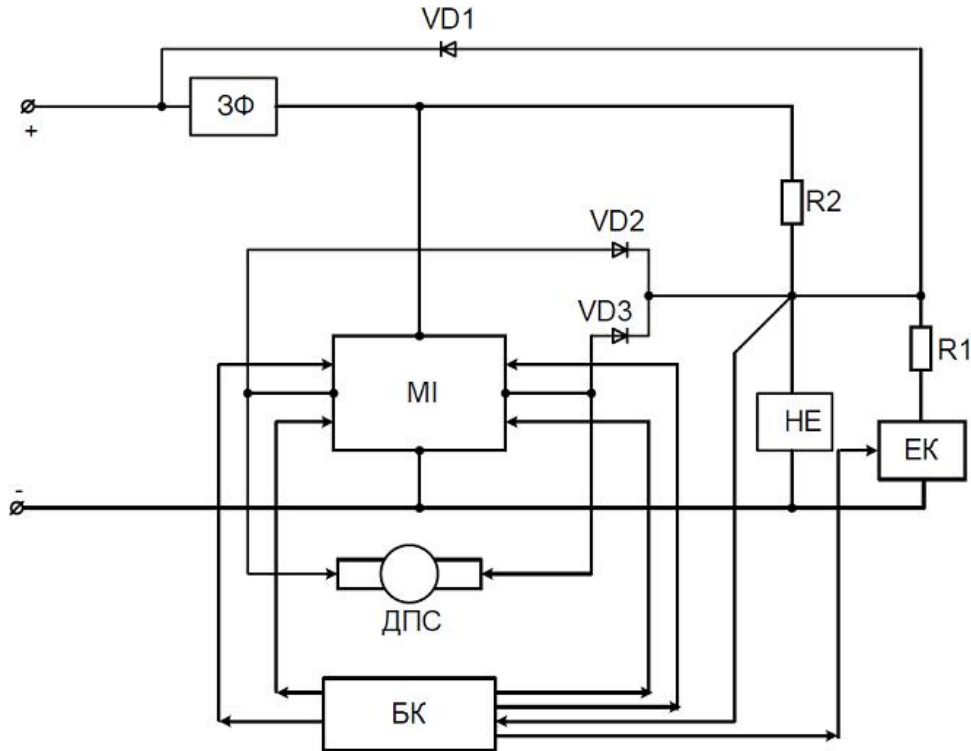


Рис. 1. Структурна схема перетворювача для керування двигуном постійного струму

Fig. 1. Circuit diagram of the converter for controlling the DC motor

У стані пуску сигналами з виходів блока керування відпирається один із «верхніх» транзисторів мостового інвертора, залежно від напрямку обертання двигуна постійного струму, і електронний ключ. Перший або другий додатковий діод відкриваються, і до двигуна постійного струму прикладається напруга $U_{дпс}$ [8]:

$$U_{дпс} = E - U_c \approx E \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{R_B * C_{HE}}\right) \right], \quad (2)$$

де R_B – опір баластного резистора; E – ЕРС двигуна; U_c – напруга на накопичувачі; C_{HE} – ємність накопичувача.

У виразі (2) впливом допоміжного резистора можна знехтувати, оскільки його опір R_D має бути значно більшим, ніж опір R_B баластного резистора [9]. За рахунок поступового розряду накопичувача електроенергії напруга, що прикладається до двигуна постійного струму, зростає повільно, аналогічно зростає й пусковий струм $I_{п}$, на відміну від типових рішень, де вона майже миттєво зростає до напруги живлення E , що зумовлює скачок пускового струму до величин:

$$I_{\max} \approx \frac{E}{R_{дпс}}, \quad (3)$$

де $R_{дпс}$ – активний опір обмоток двигуна постійного струму.

У запропонованому перетворювачі, навіть за відсутності проти ЕРС, величина пускового струму обмежена та не може бути більшою, ніж

$$I_{\max} < \frac{E}{(R_{дпс} + R_B)}, \quad (4)$$

тобто здійснюється обмеження пускового струму і забезпечується безпечніший режим роботи двигуна постійного струму та ключів мостового інвертора. Окрім того, обмеження пускового струму можна здійснювати й за рахунок індуктивності обмоток двигуна постійного струму при імпульсному регулюванні відкритого стану одного з «верхніх» транзисторів мостового інвертора [10].

Після закінчення стану пуску, при досягненні сталого обертання ротора двигуна постійного струму, починається стан робочого ходу. На цьому етапі електронний ключ замикається, а після підзаряду ємностей накопичувача енергії замикаються додаткові діоди. Регулювання швидкості обертання двигуна постійного струму та напрямку обертання здійснюється попарною комутацією ключів мостового інвертора за рахунок використання одного з відомих способів імпульсного регулювання. Робочий режим запро-

понованого перетворювача відрізняється від аналогічного режиму інших приводів тим, що в паузах регулювання, при яких замикаються всі ключі мостового інвертора, частина струму двигуна постійного струму спрямовується до накопичувача енергії і підтримує напругу на його виході, близьку до напруги живлення E . У разі підключення до мережі іншого споживача, що призведе до зменшення напруги мережі, енергія від накопичувача енергії через діод передається до мережі, тобто в паузі можливі рекуперація енергії і збільшення ККД електропривода.

Зупинка двигуна постійного струму може бути здійснена плавно за рахунок поступового зменшення часу відкривання ключів мостового інвертора або за рахунок одного з видів електричного гальмування – електродинамічного чи рекуперативного. У будь-якому режимі гальмування «верхні» ключі мостового інвертора замкнені. При електродинамічному гальмуванні від блока керування на вхід електронного ключа подається сигнал, який відмикає електронний ключ, і струм гальмування протікає через один із додаткових діодів, залежно від попереднього напрямку обертання, баластний резистор, електронний ключ, спільний провід (другий полюс джерела живлення) і один із «нижніх» зворотних діодів мостового інвертора. При цьому механічна енергія двигуна постійного струму витрачається на баластному резисторі, але такий режим мало-ефективний з енергетичного погляду і в запропонованому перетворювачі використовується тільки за відсутності в мережі живлення іншого споживача для створення безпечного режиму ключів мостового інвертора, які перебувають у цей час в замкненому стані.

Під час рекуперативного гальмування один із «нижніх» ключів мостового інвертора відмикається, залежно від напрямку обертання, за допомогою сигналу з виходу блока керування. Струм гальмування I_0 зростає, залежно від тривалентності відкритого стану ключа t_j , до потрібного значення струму $I_{\text{дпс}}$ [11]:

$$I_{\text{дпс}} \approx I_0 + \left(\frac{E}{R_e} \right) * \exp \left(-t_i * \frac{R_e}{L_e} \right), \quad (5)$$

де R_e – загальний активний опір обмоток, відкритого ключа і «зворотного» діода; L_e – еквівалентна індуктивність обмоток двигуна постійного струму.

Після замикання ключа мостового інвертора у паузі гальмування t_n за рахунок ЕРС відкривається один із додаткових діодів і здійснюється

заряд струмом $I_{\text{дпс}}$ накопичувача енергії, напруга U_{HE} на виході якого зростає. У момент, коли напруга U_{HE} зрівняється з напругою мережі E , відкривається діод і струм гальмування замикається через опір R_H іншого споживача або через внутрішній опір r_i між першим і другим полюсами джерела живлення, тобто здійснюється рекуперація енергії двигуна постійного струму до мережі, а відповідно здійснюється й підвищення ККД всього електропривода [5; 12; 15–19]. Якщо опір іншого споживача R_H менший, ніж еквівалентний опір двигуна постійного струму та відкритих діодів, тобто до тієї ж мережі підключений більш потужний споживач, або внутрішній опір r_i між полюсами джерела живлення значно менший, ніж той самий еквівалентний опір (при живленні від акумулятора), гальмування здійснюється практично постійним струмом як під час відкритого стану ключа t_i , так і під час паузи t_n . Це дозволяє зменшити втрати на обмотках двигуна і здійснити регулювання струму гальмування. Напруга на всіх елементах перетворювача не перевищує напруги живлення, чим забезпечуються безпечні режими їх функціонування.

При живленні мережі від випрямляча, наприклад на електротранспорті, можлива ситуація, коли до полюсів джерела одночасно з перетворювачем підключений менш потужний споживач або він взагалі відсутній, то R_H значно більше від R_e . Тоді під час паузи гальмування, за відсутності контролю, напруга ΔU рекуперації на полюсах джерела живлення досягла б великих значень:

$$\Delta U \approx I_{\text{дпс}} * R_H \gg E, \quad (6)$$

що призвело б до неприпустимих значень напруги на елементах перетворювача і випрямляча мережі, а також до спаду струму гальмування. Це унеможливило режим рекуперації під час гальмування.

Запропонована система була промодельована в пакеті прикладних програм Simulink, результати моделювання наведені на рис. 2 [16].

Проведене моделювання створює передумови реалізації такого схемного рішення, яке дозволить піти від використання додаткових незалежних джерел струму для обмотки збудження тягового електродвигуна (при переході з режиму руху під струмом у режим електродинамічного гальмування). Це підвищить ефективність використання електричної енергії і знизить витрати на експлуатацію та ремонт незалежного джерела струму [20].

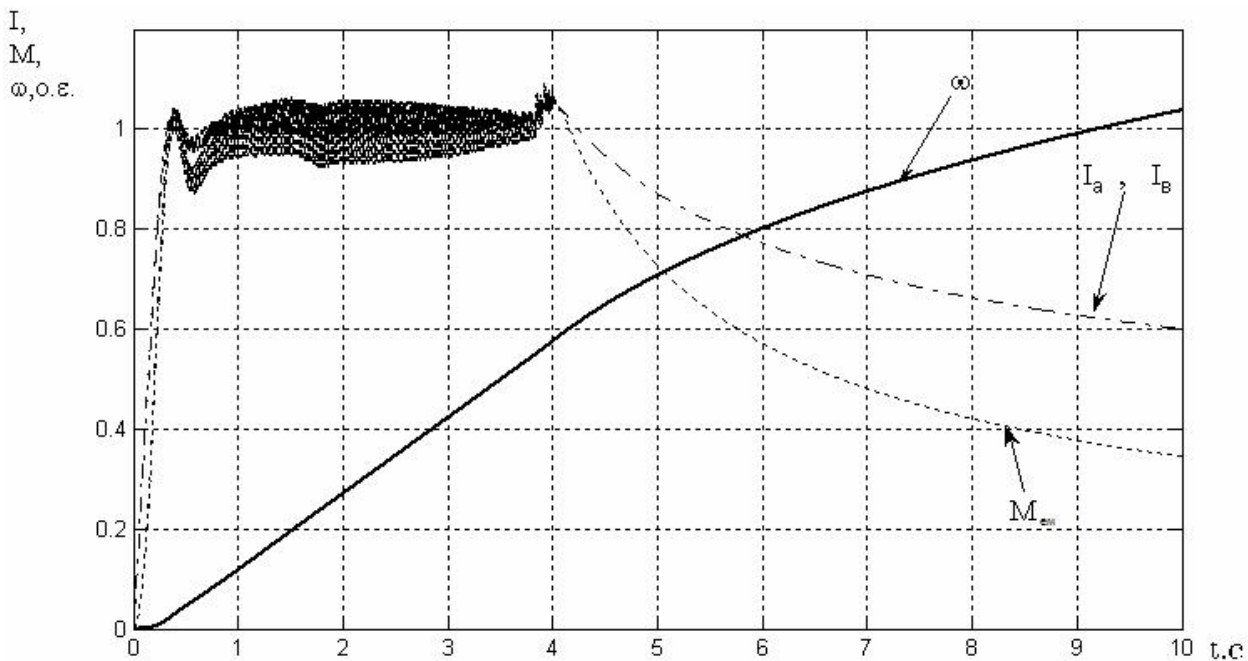


Рис. 2. Результати дослідження імпульсної схеми регулювання частоти обертання двигуна постійного струму

Fig. 2. The results of the study of the impulse scheme of regulation of the speed of rotation of the DC motor

У запропонованому перетворювачі при досягненні напругою U_{HE} на виході накопичувача енергії максимально допустимого значення E_M сигналом за додатковим входом блока керування формується сигнал відмикання електронного ключа і напруга U_{HE} починає зменшуватись за рахунок розряду накопичувача енергії через баластний резистор. Під час паузи струм гальмування підтримується близьким до сталого за рахунок підзарядки накопичувача енергії і відгалуження на баластний резистор і до мережі. Якщо напруга U_{HE} стане меншою від напруги живлення E , діод 6 замикається, рекуперативна складова струму зникає. Напруга U_{HE} також буде зменшуватись за рахунок розряду накопичувача енергії через баластний резистор і, коли вона досягне мінімально допустимого значення E_m , сигналом за додатковим входом блока керування сформується сигнал, який замикає електронний ключ. З цього моменту струмом гальмування здійснюється зарядження накопичувача енергії, напруга U_{HE} на його виході зростає, і знову відмикається діод та здійснюється рекуперативна. У момент, коли U_{HE} досягає максимально допустимого значення E_M , відмикається електронний ключ і процеси повторюються. Таким чином здійснюється підвищення ККД всього електропривода.

Висновки

1. Введення додаткових діодів, накопичувача енергії, допоміжного і баластного резисторів дозволяє плавно регулювати та обмежувати пусковий струм.
2. Реалізація схеми дає змогу зменшити втрати на обмотках двигуна постійного струму і забезпечити безпечні режими експлуатації елементів електропривода.
3. За рахунок того, що напруга на елементах перетворювача контролюється додатковим входом блока керування, вона ніколи не перевищує максимально допустимих значень.
4. Забезпечується безпечний режим роботи елементів перетворювача і випрямляча мережі.

Бібліографічний список

1. Блейз Е. С., Зимин А. В., Иванов Е. С. Следящие приводы. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 904 с.
2. Бородій В. А., Нестерова О. Ю. Компенсація різкозмінного струму якоря потужних синхронних приводів засобами автоматичної системи збудження із нестандартним алгоритмом керування. *Науковий журнал*. 2018. № 1. С. 72–80.
3. Видмиш А. А., Бабій С. М., Петрусь В. В. Теорія електропривода: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2012. 96 с.

4. Казачковский Н. Н. Сопоставление законов частотного управления на примере преобразователя частоты ALTIVAR 21. *Гірничі електромеханіка та автоматика*. 2018. № 100. С. 69–72.
5. Казмиренко В. Ф., Лесков А. Г., Введенский В. А. Системы следящих приводов. Москва: Энергоатомиздат, 1993. 304 с.
6. Ключев В. И. Теория электропривода. Москва: Энергоатомиздат, 1998. 704 с.
7. Микропроцессорные автоматические системы регулирования / В. В. Солодовников, В. Г. Коньков, В. А. Суханов, О. В. Шевяков. Москва: Высш. шк., 1991. 255 с.
8. Поджаренко В. О., Дрючин О. О., Васілевський О. В. Оптимізація імпульсного регулювання гальмування двигуна постійного струму. *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія: Автоматика, вимірювання та керування*. 2005. № 530. С. 106–110.
9. Розанов Ю. К., Флоренцев С. И. Силовая электроника в электроприводе. *Приводная техника*. 1997. № 5. С. 5–8.
10. Спосіб гальмування двигуна постійного струму та пристрій для його реалізації: пат. 47111А Україна: МКІ Н02 Р3/08; опубл. 17.06.2002, Бюл. № 6.
11. Спосіб регулювання збудження синхронних машин: пат. 135216 Україна. № 201813087; заявл. 29.12.2018; опубл. 25.06.2019, Бюл. № 12.
12. Файнштейн В. Г., Файнштейн Э. Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами. Москва: Энергоатомиздат, 1966. 240 с.
13. AC Induction Motor Control Using the constant V/f Principle and a Space-vector PWM Algorithm. URL: www.atmel.com/products/AVR/mc/avr495.pdf/AVR495 (Last accessed: 12 September 2019).
14. AC Induction Motor Control Using the constant V/f Principle and a Natural PWM Algorithm. URL: www.atmel.com/products/AVR/mc/avr494.pdf/AVR494 (Last accessed: 12 September 2019).
15. Beshta A., Aziukovskyi O., Khudoliy E. Sober assessment of economic feasibility of renewable energy and vehicle-to-grid technologies in Ukraine. *Physical & Chemical Geotechnologies: Materials of the International Scientific & Practical Conference*. Bucaramanga, 2018.
16. Beshta A., Balakhontsev A., Khudoliy S. Performances of Asynchronous Motor within Variable Frequency Drive with Additional Power Source Plugged via Combined Converter. *Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, 2019.
17. Diachenko G. G., Aziukovskyi O. O. Control laws of electric drives as a result of an in-depth kinematic analysis of the delta robot. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2018. № 1. С. 106–112.
18. Evaluation of the Small-Scale Wind Turbine Converter's Efficiency Built with Various Types of Semiconducting Devices / S. Piriienko et al. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, 2018.
19. Influence of the Control Strategy on the Efficiency of SynRM Based Small-Scale Wind Generators / Po-Wen Cheng et al. *Materials of the 20th IEEE International Conference on Industrial Technology*. Melbourne, 2019. P. 31–37.
20. Sensorless control of Two-Phase Brushless DC Motor. URL: www.atmel.com/products/AVR/mc/avr440.pdf/AVR440 (Last accessed: 12 September 2019).
21. Yalanskyi A., Yalanskyi O. Shock-wave diagnostics of voids and assessment of workload of lining of mine workings based on the construction of cartograms. 2019. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900116>.

Стаття надійшла 22.09.2019

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У МОСТОВІЙ СИСТЕМІ ВИПРЯМЛЕННЯ ТРИФАЗНОГО ЗМІННОГО СТРУМУ НА ОСНОВІ ВАРІАЦІЙНИХ ПІДХОДІВ

Віталій Левонюк, к. т. н.

*Львівський національний аграрний університет,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н,
Львівська обл., Україна,
e-mail: vitaliy_levoniuk@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.067>

Левонюк В. Р. Математичне моделювання перехідних електромагнітних процесів у мостовій системі випрямлення трифазного змінного струму на основі варіаційних підходів

У праці здійснено аналіз наукових публікацій, які стосуються дослідження електромагнітних перехідних процесів в електротехнічних системах випрямлення трифазного змінного струму. Аналіз показав, що на сьогодні не існує єдиноприйнятої теорії математичного моделювання електротехнічних систем випрямлення змінного трифазного струму, а дослідження перехідних електромагнітних процесів здійснюються із використанням готових комп'ютерних програм, які призначені для інженерних розрахунків, а не наукових. Здійснено постановку проблеми, сформульовано мету та обґрунтовано науково-практичну потребу застосування варіаційних підходів до аналізу перехідних електромагнітних процесів в електротехнічних системах випрямлення змінного трифазного струму. У роботі основний акцент поставлено на розробку математичної моделі трифазної мостової системи випрямлення змінного струму, яка виконана за схемою Ларіонова. На основі узагальненого міждисциплінарного (інтердисциплінарного) методу математичного моделювання, який ґрунтується на модифікації інтегрального варіаційного принципу Гамільтона – Остроградського, одержано рівняння електромагнітного стану досліджуваної електротехнічної системи випрямлення трифазного змінного струму. Опираючись на розроблену математичну модель, було написано програмний код алгоритмічною мовою *Visual Fortran*, за допомогою якої реалізовано інтегрування звичайних нелінійних диференціальних рівнянь методом Гіра 6-го порядку. Наведено результати комп'ютерної симуляції у формі часових розподілів функціональних залежностей струмів та напруг елементів досліджуваної системи у вигляді рисунків, що аналізуються. Розроблена математична модель та на її підґрунті написаний програмний код можуть бути корисними для навчання студентів та підвищення кваліфікації інженерів-електриків, які працюють у галузі електроенергетики та електромеханіки. Підтверджено, що розвиток міждисциплінарних методів дослідження дає змогу, виходячи з єдиного енергетичного підходу, будувати ефективні та адекватні математичні моделі динамічних систем різної фізичної природи, що істотно розширює дослідницькі можливості еwentуального користувача.

Ключові слова: математична модель, перехідні процеси, мостова система випрямлення струму, варіаційні підходи, рівняння Ейлера – Лагранжа, принцип Гамільтона – Остроградського.

Levoniuk V. Mathematical modeling of transient electromagnetic processes in the bridge system of transfer of a three-phase action current on the basis of variation approaches

The paper analyzes scientific publications, which confirm that today there is no unanimous theory of mathematical modeling of electrotechnical systems of rectification of alternating three-phase current. However, the study of transient electromagnetic processes is carried out, using ready-made computer programs, which are intended for not scientific, but engineering purposes. The research argues scientific and practical necessity of constructing of efficient and relatively simple models of electrotechnical systems of rectification of alternating three-phase current as the key elements of electric networks of direct current. The work emphasizes importance of development of a mathematical model of a three-phase bridge system of rectification of alternating current, which is performed according to the scheme of Larionov. According to the consolidated interdisciplinary (interdisciplinary) method of mathematical modeling, which is based on modifications of the Hamilton-Ostrogradsky integral variational principle, an equation of the electromagnetic state of the investigated electrotechnical system of straightening a three-phase alternating current is obtained. The mentioned mathematical model secures analysis of transient electromagnetic processes in the elements of the investigated electrotechnical system of straightening of the alternating three-phase current and their mutual influence in the physical processes under the load. Application of the variation approaches allows reproducing of physical processes in electrotechnical systems of alternating and direct currents with a high level of adequacy.

The article presents results of computer simulation of the start of the investigated electrotechnical system of rectification of alternating current in the steady state, which confirms the correctness and adequacy of the research, presented in the article.

It is stated that, basing on the unified energy approach, development of interdisciplinary research methods supplies shaping of effective and adequate mathematical models of dynamic systems of various physical nature, which significantly expand the research capabilities of an eventual user.

Key words: mathematical model, transient processes, bridge current rectification system, variational approaches, Euler – Lagrangian equation, Hamilton – Ostrogradsky principle.

Постановка проблеми. Основними елементами електропередач постійного струму є лінія електропередачі, анодні трансформатори, згладжувальні фільтри, які складаються з лінійних реакторів та різного роду ємностей, і, звичайно ж, вентильний перетворювач частоти. Цілком зрозуміло, що для якісного передавання електричної енергії постійним струмом необхідно, щоби працювали всі вищезгадані елементи, зокрема й найкоштовніший та найделікатніший серед них – вентильний випрямляч. Тому для безперебійної та ефективної роботи, уникнення пошкодження коштовних випрямних елементів згадані електротехнічні системи необхідно постійно досліджувати і вдосконалювати. Розробка нових та вдосконалення наявних електротехнічних систем випрямлення трифазного змінного струму вимагають усебічного дослідження електромагнітних процесів, які протікають у згаданих системах, не лише на етапі проектування, а й на допроектній стадії. Для виконання таких завдань у дослідників чи інженерів є два шляхи: проведення коштовних натурних експериментів або ж застосування апарату математичного моделювання.

Відомо, що апарат математичного моделювання є одним із найефективніших способів дослідження різноманітних технічних або природних систем, адже саме математичне моделювання дає змогу практично необмежено змінювати параметри, що забезпечує високу ефективність та економічність проектно-конструкторських робіт.

На сьогодні найбільш вдалою, а через це відповідно й найрозповсюдженішою схемою випрямлення змінного струму на підстанціях є схема перетворення трифазного струму, запропонована у 1924 р. А. М. Ларіоновим. Її зазвичай називають трифазною мостовою схемою, проте вона здійснює шестифазне перетворення параметрів. У реальних умовах, враховуючи можливості існуючих груп з'єднань трансформаторів, може бути досягнуто не більше 12-фазного перетворення параметрів режиму. Цілком зрозуміло, що врахування повної кількості випрямних мостів є надскладною задачею, тому ми, як і більшість дослідників, зупиняємося на еквівалентності сукупності випрямних мостів одним. Таким чином, задача зводиться до побудови математичної моделі системи випрямлення змінного струму, яка

виконана за схемою Ларіонова. Відомо, що для адекватного відтворення картини перебігу перехідних електромагнітних процесів необхідно задіювати фундаментальні закони прикладної фізики, у нашому випадку – електродинаміки [1; 15], для повноцінного опису яких потрібно заангажувати диференціальне, інтегральне та варіаційне числення. Власне, у нинішній праці ми пропонуємо математичну модель електротехнічної системи випрямлення змінного трифазного струму, яка ґрунтується на теорії звичайних диференціальних рівнянь. Згадані диференціальні рівняння електромагнітного стану досліджуваної електротехнічної системи отримано на основі варіаційних підходів [4], зокрема використовуючи модифікований інтегральний варіаційний принцип Гамільтона – Остроградського, який розроблено в [14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Нині математичним моделюванням електромагнітних процесів у вентильних системах випрямлення змінного струму займається багато наукових шкіл. Тут варто відзначити львівську школу математичного моделювання, яка також займається питаннями теорії математичного моделювання вентильних систем, у яку, своєю працею [6], вагомий внесок зробив вчений К. М. Василів. Ми пропонуємо розглянути праці, які є найближчими за тематикою до нашої нинішньої праці.

У роботі [17] запропоновано метод розрахунку перехідних електромагнітних процесів у мережі випрямлення змінного трифазного струму, яка працює на лінію електропередачі постійного струму з активно-індуктивним навантаженням з урахуванням зовнішніх впливів. Згаданий метод ґрунтується на теоріях електричних кіл та електромагнітного поля. Представлено результати розрахунку перехідних процесів напруги та струму у вигляді графіків, які аналізуються.

У статті [5] розроблено математичну модель електричної мережі, ключовим елементом якої є тиристорний перетворювач частоти з ланкою постійного струму. На підставі математичної моделі розроблено алгоритм та програмний комплекс, який дає змогу моделювати електромагнітні процеси, які протікають у згаданій електричній мережі. Побудову математичної моделі виконано за модульним принципом, а програмний засіб

створено з використанням об'єктно-орієнтованого програмування. Аналіз електромагнітних процесів в електричній мережі здійснено для різних частот на вході й виході комутатора за різних значень кута регулювання випрямляча та інвертора.

У праці [8] здійснено моделювання перетворювальних підстанцій та ліній електропередач постійного струму. Використані в цій праці методи математичного опису перетворювальних підстанцій можна звести до двох основних груп: змінної та постійної структури. Методи першої групи, в яких використано заміну тиристора ключем, передбачають зміну структури електричного кола при зміні провідності тиристорів, що відображає тим самим змінний характер схеми перетворювача. Друга група методів ґрунтується на заміні вентиля пасивним двополюсником, параметри якого різко змінюються при зміні провідності вентиля. Система рівнянь перетворювача та коефіцієнти, які при цьому детермінуються параметрами провідних та непровідних у певний момент тиристорів, набувають постійної структури і придатні для розрахунку будь-яких електромагнітних станів.

У статті [18] репрезентовано метод гібридного електромагнітного моделювання *AC/DC* систем. Тут мережа змінного струму моделюється в електромеханічному режимі, а електромагнітний перехідний стан електропередачі *HVDC* – розраховується аналітичним методом. Інтерфейс електромеханічно-електромагнітного перехідного гібридного моделювання реалізований на основі теорії альтернативної ітерації. Аналіз перехідних електромагнітних процесів здійснено як для симетричних, так і несиметричних режимів роботи мережі змінного струму.

У роботі [20] представлено методіку керування *HVDC* системами для покращання стабільності перехідних процесів. Запропонована методіка дає змогу здійснювати контроль потужності через випрямлячі та інвертори під час перехідних режимів роботи. У цій праці потік потужності в *HVDC* системі моделюється додаванням допоміжного сигналу до основного потоку випрямляча. Тут представлено та детально проаналізовано перехідні процеси напруг і струмів у системі пересилання енергії постійного струму, проте нічого не сказано ні про використаний підхід для побудови математичної моделі, ні про використані методи числового моделювання.

Відомо, що електротехнічні системи випрямлення змінного струму використовують не лише в електроенергетиці, а й в електромеханіці, зокрема у синхронних електричних машинах та

машинах постійного струму, тому варто відзначити й наукові праці, в яких розглянуто згадані електротехнічні системи випрямлення струму в електромеханічних системах. Так, у праці [11] наведено математичну модель каскаду: однофазний двопівперіодний випрямляч з двома вентилями – мотор постійного струму з паралельним збудженням, а також запропоновано метод аналізу перехідних та ustalених режимів його роботи. Математична модель вентильного випрямляча ґрунтується на теорії звичайних диференціальних рівнянь, які отримано на основі теорії нелінійних електромагнітних кіл.

Аналіз літератури дає підстави стверджувати, що на сьогодні немає єдиноприйнятої теорії до побудови математичних моделей електротехнічних систем випрямлення змінного струму. Науковці схиляються до різноманітних методів та підходів, які не завжди ґрунтуються на основних засадах прикладної фізики та законах електродинаміки, а отже, розроблені моделі не завжди з достатньою точністю відтворюють фізичну картину перебігу електромагнітних процесів у згаданих системах. Отже, можна зробити висновок, що на сьогодні методи та засоби аналізу перехідних електромагнітних процесів в електротехнічних системах випрямлення змінного струму не є повністю досконалими й потребують доопрацювання з додатковим залученням універсальних підходів.

Постановка завдання. Метою нинішньої праці є покращання методів аналізу перехідних електромагнітних процесів у системах випрямлення трифазного змінного струму на основі варіаційних підходів, зокрема з використанням модифікованого принципу Гамільтона – Остроградського.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 репрезентовано розрахункову схему електротехнічної системи випрямлення змінного трифазного струму. Досліджувана електротехнічна система складається з трифазної мережі змінного струму, катодної й анодної вентильних груп та еквівалентного активно-індуктивного навантаження. Трифазна електрична мережа представлена фазними електрорушійними силами $e_{m,j}$, індуктивностями $L_{m,j}$ та активними опорами $R_{m,j}$. Еквівалентне активно-індуктивне навантаження представлене відповідно активним опором R_H та індуктивністю L_H навантаження. Випрямні вентиля катодної та анодної вентильних груп на розрахунковій схемі представлено активно-індуктивними гілками. Така

еквівалентність вентилів відома вже давно [10] і користується популярністю й нині [6], оскільки нею дуже зручно моделювати роботу вентиля. Відкритому стану вентиля відповідають малі значення активного опору та індуктивності, а запертому стану – безмежно великі значення згаданих параметрів.

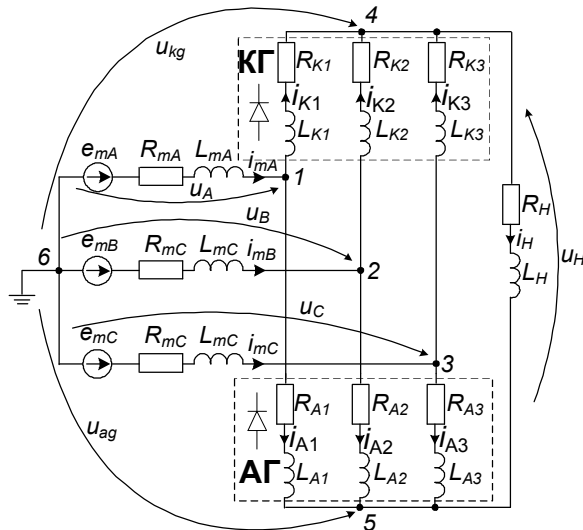


Рис. 1. Розрахункова схема мостової системи випрямлення трифазного змінного струму

Fig. 1. Schematic diagram of the bridge system of rectifying of three-phase alternating current

Ми вже згадували, що для забезпечення високої адекватності математичної моделі досліджуваного об'єкта необхідно правильно застосувати фундаментальні фізичні закони, які ґрунтуються на теоріях звичайних диференціальних рівнянь та диференціальних рівнянь з частинними похідними. Таким чином, побудова математичної моделі реального фізичного об'єкта зводиться до формування системи диференціальних рівнянь стану досліджуваного об'єкта. Ми пропонуємо для аналізу перехідних електромагнітних процесів в електротехнічній системі випрямлення змінного трифазного струму, зображений на рис. 1, використовувати модифікований принцип Гамільтона – Остроградського. Це дає змогу уникнути декомпозиції єдиної динамічної системи та одержати вихідні рівняння стану виключно з єдиного енергетичного підходу, за допомогою побудови розширеної функції Лагранжа [12; 14].

Для досліджуваної електротехнічної системи випрямлення змінного струму (див. рис. 1) розширений функціонал дії за Гамільтоном – Остроградським виглядає так [14]:

$$S = \int_0^t L^* dt, \quad (1)$$

де S – дія за Гамільтоном – Остроградським, L^* – розширена функція Лагранжа.

Розширена функція Лагранжа виглядає так [14]:

$$L^* = \tilde{T}^* - P^* + \Phi^* - D^*, \quad (2)$$

де \tilde{T}^* – кінетична коенергія, P^* – потенціальна енергія, Φ^* – енергія дисипації, D^* – енергія сторонніх непотенціальних сил.

Для досліджуваної електротехнічної системи випрямлення змінного струму запишемо елементи розширеної функції Лагранжа [14; 16]:

$$T^* = \sum_{j=A}^C \frac{L_{m,j} i_{m,j}^2}{2} + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{L_{K,i} i_{K,i}^2}{2} + \frac{L_{A,i} i_{A,i}^2}{2} \right) + \frac{L_H i_H^2}{2}, \quad (3)$$

$$\Phi^* = \frac{1}{2} \sum_{j=A}^C \int_{t=0}^t R_{m,j} i_{m,j}^2 dt + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \int_{t=0}^t (R_{K,i} i_{K,i}^2 + R_{A,i} i_{A,i}^2) dt + \frac{1}{2} \int_{t=0}^t R_H i_H^2 dt, \quad D^* = \sum_{j=A}^C \int_{t=0}^t e_{m,j} i_{m,j} dt, \quad P^* = 0, \quad (4)$$

а також приймаємо таке:

$$\frac{\partial T^*}{\partial Q} = u, \quad (5)$$

де $j = A, B, C$ – найменування фази електричної мережі; $i = 1, 2, 3$ – номер вентиля відповідної групи; $e_{m,j}$ – фазна електрорушійна сила j -тої фази електричної мережі змінного струму; $L_{m,j}$ – індуктивність j -тої фази електричної мережі змінного струму; $R_{m,j}$ – активний опір j -тої фази електричної мережі змінного струму; $L_{K,i}, L_{A,i}$ – індуктивність i -го вентиля катодної та анодної вентиляльної групи відповідно; $R_{K,i}, R_{A,i}$ – активний опір i -го вентиля катодної та анодної вентиляльної групи відповідно; R_H – активний опір гілки навантаження; L_H – індуктивність гілки навантаження; $i_{m,j}$ – струм j -тої фази електричної мережі змінного струму; $i_{K,i}, i_{A,i}$ – струм i -го вентиля катодної та анодної вентиляльної групи відповідно; i_H – струм через гілку навантаження.

Відомо [4], що якщо взяти варіацію функціоналу дії за Гамільтоном – Остроградським (1) та прирівняти її до нуля, то після мінімізації згаданого отримаємо рівняння Ейлера – Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L^*}{\partial q_k} = 0, \quad (6)$$

де q – узагальнена координата; $\dot{q} = dq/dt$ – узагальнена швидкість; k – число степенів вільності системи.

Введемо узагальнені координати для голономної системи, яка представлена на рис. 1, а також знайдемо відповідні їх узагальнені швид-

кості: $q_{(1)} = Q_{m,j}$ – заряд заступної гілки відповідної фази; $\dot{q}_{(1)} = \frac{dQ_{m,j}}{dt} = i_{m,j}$ – фазний струм електричної мережі змінного струму.

Зауважимо, що в рівняння Ейлера – Лагранжа (6) підставляємо лише складники, які стосуються елемента, для якого будемо отримувати рівняння електромагнітного стану, оскільки похідні по інших функціях (узагальнених координатах) тотожно рівні нулю, позаяк по останніх диференціювання не проводиться.

Запишемо рівняння Ейлера – Лагранжа (6) для вибраної узагальненої координати з урахуванням (3) – (5), ураховуючи, що $\frac{\partial T^*}{\partial Q_{m,j}} = -u_{m,j}$

[12]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_1} \left(\frac{L_{m,j} i_{m,j}^2}{2} + \frac{1}{2} \int_0^t (r_{m,j} i_{m,j}^2) d\tau - \int_0^t e_{m,j} i_{m,j} d\tau \right) - \frac{\partial T^*}{\partial q_1} = 0. \quad (7)$$

Змінюючи черговість диференціювання (7) та застосовуючи теорему про похідну інтеграла за верхньою межею, отримаємо рівняння екстремалей функціонала дії за Гамільтоном – Остроградським:

$$\frac{d}{dt} \left(L_{m,j} i_{m,j} + \int_0^t (r_{m,j} i_{m,j}) d\tau - \int_0^t e_{m,j} d\tau \right) - \frac{\partial T^*}{\partial Q_{m,j}} = 0; \quad (8)$$

$$L_{m,j} \frac{di_{m,j}}{dt} + r_{m,j} i_{m,j} - e_{m,j} + u_{m,j} = 0. \quad (9)$$

З рівняння (9) легко отримуємо рівняння (10), репрезентуючи його в нормальній формі Коші.

Задля зменшення обсягу матеріалу статті ми не будемо наводити отримання всіх рівнянь електромагнітного стану досліджуваної електротехнічної системи, а лише наведемо кінцеві рівняння Ейлера – Лагранжа (ознайомитися з процедурою отримання рівнянь подібного характеру на основі варіаційних підходів можна у працях [9; 13; 19]):

$$\frac{di_{m,j}}{dt} = \frac{1}{L_{m,j}} (e_{m,j} - R_{m,j} i_{m,j} - u_j), \quad j = A, B, C; \quad (10)$$

$$\frac{di_{K,i}}{dt} = \frac{1}{L_{K,i}} (u_j - R_{K,i} i_{K,i} - u_{kg}), \quad j = A, B, C, i = 1, 2, 3; \quad (11)$$

$$\frac{di_{A,i}}{dt} = \frac{1}{L_{A,i}} (u_j - R_{A,i} i_{A,i} - u_{ag}), \quad j = A, B, C, i = 1, 2, 3; \quad (12)$$

$$\frac{di_H}{dt} = \frac{1}{L_H} (u_{kg} - R_H i_H - u_{ag}), \quad (13)$$

де u_j, u_{kg}, u_{ag} – фазна напруга j -тої фази, напруга катодної та анодної вентильних груп відповідно.

Аналізуючи рівняння (10) – (13), бачимо, що в них є невідомі функції напруг $u_A, u_B, u_C, u_{kg}, u_{ag}$. Задля зменшення обсягу статті ми репрезентуємо процедуру знаходження згаданих напруг у загальному випадку, лише для напруг u_A, u_B та u_C , а для напруг u_{kg}, u_{ag} – наведемо кінцеві вирази. Репрезентуємо методологію пошуку згаданих напруг.

Для вузлів № 1, 2 та 3 розрахункової схеми електротехнічної системи випрямлення змінного трифазного струму, яка наведена на рис. 1, запишемо рівняння за першим законом Кірхгофа:

$$i_{m,j} - i_{K,i} - i_{A,i} = 0, \quad j = A, B, C, i = 1, 2, 3. \quad (14)$$

Продиференціювавши за часом вираз (14), з урахуванням початкових умов [14], отримаємо:

$$\frac{di_{m,j}}{dt} - \frac{di_{K,i}}{dt} - \frac{di_{A,i}}{dt} = 0, \quad j = A, B, C, i = 1, 2, 3. \quad (15)$$

Далі, підставивши у вираз (15) рівняння (10) – (12) при $j = A, B, C$ та $i = 1, 2, 3$, отримаємо:

$$\frac{1}{L_{m,j}} (e_{m,j} - R_{m,j} i_{m,j} - u_j) - \frac{1}{L_{K,i}} (u_j - R_{K,i} i_{K,i} - u_{kg}) - \frac{1}{L_{A,i}} (u_j - R_{A,i} i_{A,i} - u_{ag}) = 0. \quad (16)$$

Виразивши з виразу (16) напругу u_j , при $j = A, B, C$ та $i = 1, 2, 3$, отримаємо:

$$u_j = \left(\frac{1}{L_{m,j}} + \frac{1}{L_{K,i}} + \frac{1}{L_{A,i}} \right)^{-1} \left(\frac{1}{L_{m,j}} (e_{m,j} - R_{m,j} i_{m,j}) + \frac{1}{L_{K,i}} (R_{K,i} i_{K,i} - u_{kg}) + \frac{1}{L_{A,i}} (R_{A,i} i_{A,i} - u_{ag}) \right). \quad (17)$$

Напруги катодної та анодної вентильних груп при $j = A, B, C$ та $i = 1, 2, 3$ виглядають так:

$$u_{kg} = \left(\sum_{i=1}^3 \frac{1}{L_{K,i}} + \frac{1}{L_H} \right)^{-1} \left(\sum_{j=A}^C \sum_{i=1}^3 \frac{1}{L_{K,i}} (u_j - R_{K,i} i_{K,i}) + \frac{1}{L_H} (R_H i_H + u_{ag}) \right); \quad (18)$$

$$u_{ag} = \left(\sum_{i=1}^3 \frac{1}{L_{A,i}} + \frac{1}{L_H} \right)^{-1} \left(\sum_{j=A}^C \sum_{i=1}^3 \frac{1}{L_{A,i}} (u_j - R_{A,i} i_{A,i}) + \frac{1}{L_H} (u_{kg} - R_H i_H) \right). \quad (19)$$

Відомо [3; 7], що в реальних системах випрямлення трифазного змінного струму відбувається постійне керування роботою вентильних груп за допомогою систем імпульсно-фа-

зового керування. Отже, для повноцінної та адекватної роботи розробленої математичної моделі необхідно представити логічні рівняння керування роботою вентилів.

Роботу системи імпульсно-фазового керування вентилями групами опишемо системою логічних рівнянь, яка виглядає так [2; 6]:

$$Z_i = Z_{u,i} \wedge Z_{K,i} \wedge Z_{\gamma,i} = \text{true} \quad (i = 1, 2, 3), \quad (20)$$

де Z_i – умова відкриття i -го вентиля (i -тий вентиль відкривається за істинного значення Z_i); $Z_{u,i}$ – умова відкриття вентилів за напругою ($Z_{u,i}$ приймає значення істини за додатної напруги на i -му вентилю); $Z_{K,i}$ набуває значення істини, коли i -тий вентиль запертий; $Z_{\gamma,i}$ – умова відкриття вентилів за кутом регулювання (вентиль відкривається тоді, коли його кут перебуває в межах зони подачі імпульсів на відкриття).

Сумісному інтегруванню підлягає така система нелінійних звичайних диференціальних рівнянь: (10) – (13) з урахуванням виразів (16) – (20).

Результати комп'ютерного моделювання.

На підґрунті розробленої математичної моделі було написано програмний код алгоритмічною мовою *Visual Fortran* та здійснено комп'ютерне моделювання перехідних електромагнітних процесів у мостовій системі випрямлення трифазного змінного струму (див. рис. 1). Комп'ютерна симуляція здійснювалася для таких параметрів елементів розрахункової схеми: $L_{m,j} = 0,015$ Гн, $R_{m,j} = 2,1$ Ом, $R_H = 250$ Ом, $L_H = 10$ Гн; при відкритих вентилях $L_{K,i}$, $L_{A,i}$, $R_{K,i}$, $R_{A,i}$ мають незначущо малі значення, а при закритих – безмежно великі. Параметри режиму такі: $e_{m,j} = 400 \cdot \sin(\omega t, \omega t + 120^\circ, \omega t - 120^\circ)$ кВ, $f = 50$ Гц. Інтегрування системи нелінійних диференціальних рівнянь здійснювали методом Гіра 6-го порядку, з кроком $\Delta t = 1$ мкс.

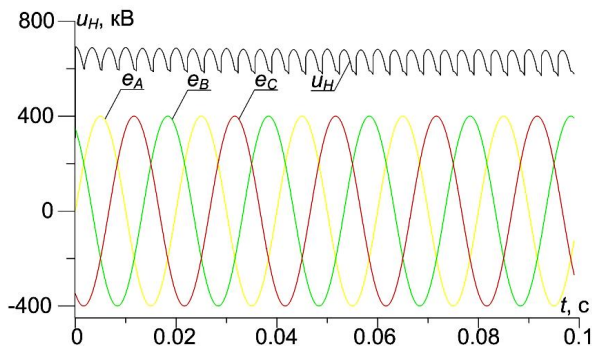


Рис. 2. Розрахункові функціональні залежності фазних електрорушійних сил та випрямленої напруги при $\alpha_0 = 0^\circ$

Fig. 2. Calculated functional dependence of phase electromotive forces and the rectified voltage at $\alpha_0 = 0^\circ$

Дослідження електромагнітних процесів здійснювали для увімкнення досліджуваної електротехнічної системи та її виходу в усталений стан. За нульових початкових умов, у момент часу $t = 0$ с, наявним у системі електрорушійним силам було присвоєно відповідні значення.

На рис. 2 репрезентовано перехідний процес випрямленої напруги та розрахункові залежності фазних електрорушійних сил. З рисунка бачимо, що амплітуда електрорушійних сил становить 400 кВ, а випрямлене значення напруги 700 кВ. Також видно, що після виходу в усталений стан випрямлена напруга зменшила своє значення приблизно на 5 кВ.

Часові розподіли розрахункових функціональних залежностей фазних струмів електричної мережі змінного струму представлено на рис. 3. Варто зазначити, що тут струм фази A та C представлено лише до моменту часу 0,1 с, а струм фази B – на всьому часовому діапазоні. Це зроблено для того, щоб еwentуальний спостерігач мав змогу більш детально побачити картину перехідного процесу струму окремої фази. З рисунка видно, що усталене амплітудне значення фазного струму становить приблизно 2,5 кА.

На рис. 4 показано перехідні процеси струмів катодної вентиляльної групи. Тут, як і на попередньому рисунку, струм першого та третього вентиля представлено лише до половини часового розподілу, а струм другого вентиля – на всьому інтервалі. З рисунка бачимо очікувані результати, зокрема, півперіоди фазних струмів мають максимальне значення 2,5 кА.

Рис. 5 репрезентує перехідний процес випрямленого струму через гілку навантаження. Бачимо, що перехідний процес триває приблизно 0,18 с, що легко пояснюється сталою часу еквівалентного активно-індуктивного навантаження. Очікуване усталене значення струму становить 2,5 кА.

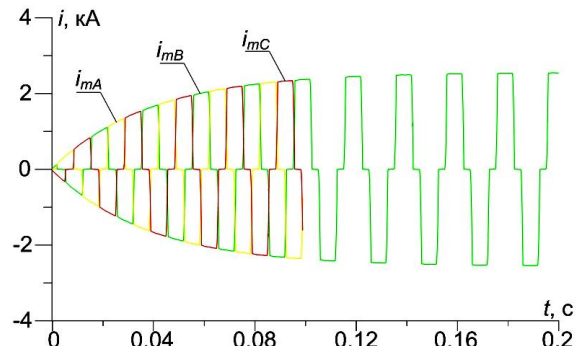


Рис. 3. Розрахункові функціональні залежності фазних струмів електричної мережі при $\alpha_0 = 0^\circ$

Fig. 3. Calculated functional dependence of phase currents in the electrical grid at $\alpha_0 = 0^\circ$

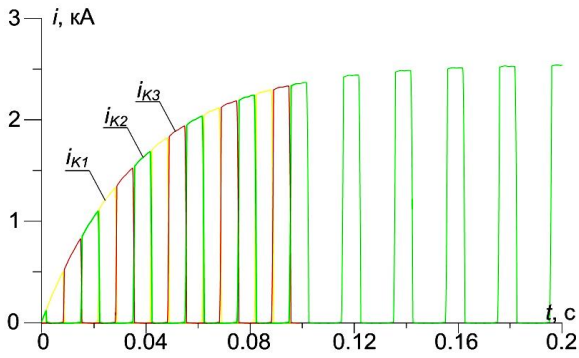


Рис. 4. Розрахункові функціональні залежності струмів вентилів катодної групи при $\alpha_g = 0^\circ$

Fig. 4. Calculated functional relationships of valves cathodic current group at $\alpha_g = 0^\circ$

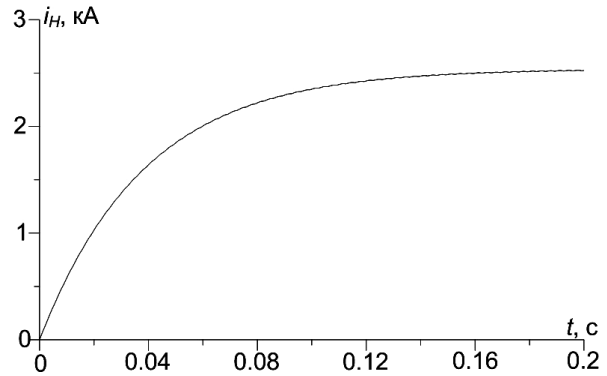


Рис. 5. Розрахункова функціональна залежність випрямленого струму при $\alpha_g = 0^\circ$

Fig. 5. Calculated functional dependence of the rectified current at $\alpha_g = 0^\circ$

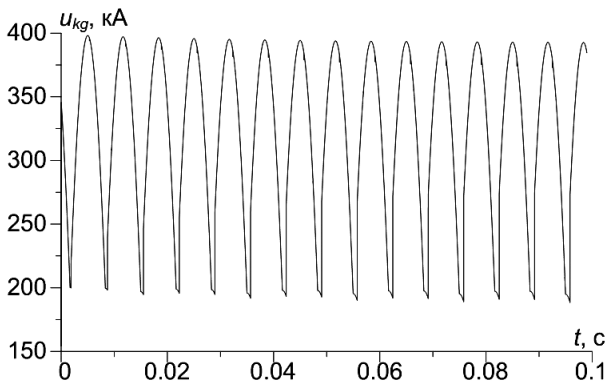


Рис. 6. Розрахункова функціональна залежність напруги катодної вентиляльної групи при $\alpha_g = 0^\circ$

Fig. 6. Calculated functional dependence of the voltage of the cathode valve group at $\alpha_g = 0^\circ$

На рис. 6 показано перехідний процес напруги катодної вентиляльної групи. Ця напруга має змінний, проте знакопостійний характер, максимальне значення якої лежить у межах 400 кВ. Функція напруги катодної вентиляльної групи разом із функцією напруги анодної вентиляльної групи утворюють функцію випрямленої напруги на виході випрямляча, графічна інтерпретація якої репрезентована на рис. 2 (крива u_H).

Отримані результати комп'ютерної симуляції перехідних електромагнітних процесів у мостовому випрямлячі трифазного змінного струму підтверджуються теоретичними положеннями класичної електродинаміки [1; 15] та класикою моделювання перехідних процесів в електро-машинно-вентильних системах [10].

Висновки

1. Застосування інтердисциплінарного методу математичного моделювання, який ґрунтується на модифікації інтегрального варіаційного принципу Гамільтона – Остроградського, до побудови математичних моделей електротехнічних систем випрямлення змінного трифазного струму дає змогу уникнути декомпозиції єдиної динамічної системи та досліджувати перехідні електромагнітні процеси в електротехнічних системах пересилання енергії постійним та змінним струмом.

2. Розрахункові функціональні залежності перехідних процесів напруг та струмів (див. рис. 2 – 6) в елементах електротехнічної системи випрямлення змінного трифазного струму (див. рис. 1), підтверджують фізичні засади електродинаміки стосовно перебігу перехідних електромагнітних процесів у згаданих системах, що говорить про високу адекватність розробленої математичної моделі й тим самим підтверджує можливість застосування варіаційних підходів до аналізу перехідних електромагнітних процесів у динамічних системах подібного плану.

3. Розроблена математична модель та на її підґрунті написаний програмний код можуть бути корисними для навчання студентів та підвищення кваліфікації інженерів-електриків, які працюють у галузі електроенергетики та електромеханіки.

Бібліографічний список

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Москва: Высш. шк., 1973. 658 с.
2. Боднар Г. Й., Шаповалов О. В. Электропривід водяного насоса протипожежного водопроводу з авто-

номним живленням. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика.* 2008. С. 373 – 374.

3. Буслова Н. В., Винославский В. Н., Денисенко Г. Н., Перхач В. С. Электрические системы и сети. Киев: Вища шк., 1986. 584 с.

4. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. Москва: Мир, 1987. 536 с.

5. Василів К., Герман А., Дорош В. Математична модель системи електроживлення на базі вентильного перетворювача частоти з ланкою постійного струму. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження.* 2012. № 16. С. 352 – 362.

6. Василів К. М. Методи і моделі аналізу процесів автономних систем електроживлення на базі асинхронізованого генератора з безконтактним каскадним модульованим збуджувачем: дис. ... д-ра техн. наук. Київ, 2010. 400 с.

7. Веников В. А. Электрические системы. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения. Москва: Высш. шк., 1972. 368 с.

8. Дижур Д. П. Цифровое моделирование электропередач постоянного тока. *Передача энергии постоянным током.* 1985. С. 51 – 63.

9. Левониук В. Р., Чабан Г. В. Дослідження електромеханічних процесів у вимикачі надвисокої напруги. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження.* 2018. № 22. С. 121 – 128.

10. Плахтына Е. Г. Математическое моделирование электро-машинно-вентильных систем. Львов: Вища шк., 1986. 163 с.

11. Самогий В., Дзелендзяк У. Математична модель каскаду «Однофазний двопівперіодний випрямляч – мотор постійного струму з паралельним збудженням». *Вісник Національного університету*

«Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2013. № 753. С. 35 – 40.

12. Уайд Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. Ленинград: Энергия, 1964. 539 с.

13. Чабан А. В., Левониук В. Р., Дробот І. М., Герман А. Ф. Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу. *Електротехніка і Електромеханіка.* 2016. № 3. С. 30 – 35.

14. Чабан А. В. Принцип Гамільтона – Остроградського в електромеханічних системах. Львів: Вид-во Тараса Сороки, 2015. 488 с.

15. Шимони К. Теоретическая электротехника. Москва: Мир, 1964. 785 с.

16. Czaban A., Lis M., Sosnowski J., Lewoniuk W. Model matematyczny dwuprzewojowej linii zasilania z wykorzystaniem modyfikowanej zasady Hamiltona. *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe.* 2016. Nr 1. S. 31 – 36.

17. Huo X. Y., Lei Y. Z. A new method for calculating transient electromagnetic responses of AC/DC power system with external electromagnetic pulse interference. *Progress In Electromagnetics Research M.* 2010. P. 245 – 260.

18. Hybrid simulation of AC-DC power system based on analytical method for computing transient response of HVDC / Z. Jingfan et al. *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering.* 2016. P. 993 – 997.

19. Mathematical modelling of transient processes in power supply grid with distributed parameters / A. Czaban, M. Lis, M. Chrzan, A. Szafraniec, V. Levoniuk *Przegląd elektrotechniczny.* 2018. № 1. P. 17 – 20.

20. Omid Borazjani, Alireza Rajabi, Mojtaba Saeedimoghadam, Khodakhast Isapour. Stability Improvement of AC System by Controllability of the HVDC. *International Journal of Electrical and Computer Engineering.* 2015. No. 3. P. 371 – 378.

Стаття надійшла 13.09.2019

СТРУКТУРНО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РІЗНИХ СПОСОБІВ ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Дмитро Гречин, к. т. н., Іван Дробот,
Степан Хімка, к. т. н., Маркіян Гошко, к. т. н.
Львівський національний аграрний університет,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: hrechynd@ukr.net

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.075>

Гречин Д., Дробот І., Хімка С., Гошко М. Структурно-математичне моделювання різних способів пуску асинхронного двигуна

У праці визначено проблему частих пусків електродвигунів у механізмах, які працюють у повторно-короткочасних режимах, а також енергозбереження під час пуску. Найчисленніше використання у виробничих процесах притаманне асинхронному двигуну з короткозамкненим ротором. Здійснений аналіз публікацій показав доцільність проведення досліджень в окресленому напрямі, для забезпечення кращих техніко-економічних показників, а також використання регульованого електроприводу, застосування перетворювачів між мережею та електродвигуном тощо. Завдання дослідження – за допомогою структурно-математичної моделі асинхронного двигуна в середовищі MATLAB / Simulink, а також додаткового обладнання дослідити різні способи пуску асинхронного двигуна. Мета роботи – за допомогою побудованих моделей дослідити різні способи пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. У роботі побудовано структурно-математичну модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, а також додаткового обладнання: перемикач за схемою «зірка-трикутник», пристрою плавного пуску, перетворювача частоти. Проведено моделювання чотирьох способів пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором під навантаженням: прямий, з перемикач за схемою «зірка-трикутник», з використанням пристрою плавного пуску, з перетворювачем частоти. Перші два способи пуску забезпечують просту й дешеву схему керування, а за допомогою технічних засобів, таких як пристрій плавного пуску та перетворювач частоти, можна отримати регульований та контрольований запуск асинхронного двигуна, а саме такі параметри: регулювати час пуску, вводити обмеження, забезпечити регулювання чи домогтися певного значення моменту, пускового струму тощо. За допомогою перетворювача частоти можна отримати регульовану швидкість обертання асинхронного двигуна з різними законами керування.

Ключові слова: асинхронний двигун, пуск, структурно-математична модель, перехідні процеси.

Hrechyn D., Drobot I., Khimka S., Hoshko M. Structural-mathematical modeling of the different methods of initiating an induction motor

The work determines problem of frequent starting of electric motors in the mechanisms, operating in repeated-short-term modes, as well as energy saving during start-up. In production processes, the most extensive use is inherent in an induction motor with a short-circuited rotor. The analysis of publications has shown the feasibility of conducting research in the above-mentioned direction to provide the best technical and economic indicators, as well as the use of a regulated electric drive, the use of converters between the network and the electric motor, etc. The research objective is to investigate the various methods of starting of an induction motor with the help of a structural and mathematical model of the induction motor in MATLAB / Simulink environment, as well as additional equipment. The purpose of the work is to investigate the various methods of starting an induction motor with a short-circuited rotor, using the constructed models. The research described a constructed structural-mathematical model of induction motor with a short-circuited rotor, as well as additional equipment: switching by the «star-triangle» scheme, the device of smooth start-up, frequency converter. The article describes simulation of four methods of starting of an induction motor with a short-circuited rotor under load, particularly a direct one, with switching according to the «star-triangle» scheme, using a soft start device, with a frequency converter. The first two start-up methods provide a simple and inexpensive control scheme, and by means of technical means such as a soft start device and frequency converter, an adjustable and controlled start of the induction motor can be obtained, namely, the startup, introduction of restrictions, regulation or provision of a certain value of moment, starting current.

Key words: induction motor, start, structural and mathematical model, transient processes.

Постановка проблеми. За умов швидкого розвитку інформаційних систем, а водночас і засобів виробництва розширюються можливості підвищення ефективності виробничих процесів.

Енергозбереження в електроприводі має дуже важливе значення, оскільки електропривод є основним споживачем електроенергії. А тому режими його роботи, типи електроприводу, спо-

соби та межі регулювання мають вирішальне значення з погляду енергозбереження.

Стрімкий розвиток силової електроніки та мікропроцесорної техніки розширює функціональні можливості електроприводу, а також його економічність. Завдяки цьому підвищується ефективність різних технологічних процесів.

Технологічні процеси задають умови та режими роботи електроприводу. У великій кількості технологічних процесів електропривод працює у повторно-короткочасних режимах роботи. Це призводить до частих пусків електродвигунів. Найчастіше використовується асинхронний трифазний електродвигун із короткозамкненим ротором. Найпоширенішим є його прямиий пуск. При цьому двигун споживає струм у 5 – 7 разів більший від номінального. Це призводить до перевантажень та перегріву самого двигуна, перевантаження мережі та комутаційно-захисного обладнання пусковими струмами, коливанням напруги у мережі. Тому питання пуску асинхронного двигуна не втрачають своєї актуальності.

Сучасні напівпровідникові перетворювачі усувають низку недоліків. Але вони мають високу вартість. А тому доцільно провести дослідження різних способів пуску, зокрема оцінити технологічні показники пуску асинхронного двигуна, такі як пусковий струм, момент, час пуску тощо.

Один із найзручніших способів дослідження – це моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Основна частина електроприводів, зокрема в сільському господарстві, нерегульовані. Найчастіше перетворення електричної енергії на механічну відбувається за допомогою асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Для забезпечення високого рівня енергозбереження в електроприводі існує кілька шляхів [4; 6–12; 13–16]:

1) під час проектування це вдосконалення алгоритму вибору електродвигуна для конкретного виду обладнання. Електродвигуни зі зниженою потужністю перевантажуються та швидко виходять з ладу, а електродвигуни зі завищеною потужністю працюють недовантаженими, неефективно перетворюють електричну енергію на механічну, наявні високі втрати енергії в самому електродвигуні та мережі живлення, низький коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності. Допущена помилка у виборі електродвигуна призводить до високих перевитрат і погіршення економічності нерегульованого масового електроприводу;

2) заміна електродвигунів енергозберігаючими двигунами. Ці двигуни мають поліпшені номінальні дані, такі як коефіцієнт корисної дії та

коефіцієнт потужності, за рахунок збільшеної маси активних матеріалів (заліза та міді);

3) забезпечення роботи електроприводу в раціональних режимах. Цей спосіб реалізується за рахунок створення та використання вже існуючих технічних засобів, які мінімізують шкідливий вплив відхилення навантажень від номінальних, а також енергетичних показників. Це є обладнання, яке вмикається між мережею та електродвигуном. За допомогою цього обладнання, окрім енергозбереження, здійснюють регулювання режимів роботи двигуна, таких як пуск, гальмування, швидкість та момент, обмежують струм, забезпечують захист та діагностику. За допомогою такого обладнання підвищують загальний технічний рівень електроприводу в цілому, а відповідно і його надійність;

4) уникання роботи електроприводу в режимі неробочого ходу, тобто роботи електродвигуна при від'єднаному механізмі або механізмі, який не виконує роботи;

5) заміна нерегульованого електроприводу регульованим. Загалом є два способи зменшення енергоспоживання: перший – зменшення втрат енергії у силових перетворювачах електроприводу, а другий – за рахунок регулювання швидкості обертання електродвигуна регулювати технологічні показники робочої машини в технологічному процесі. Перший випадок передбачає відмову від додаткових механічних перетворювачів та регуляторів швидкості обертання. У другому випадку економії енергії домагаються за рахунок технологічного процесу, що обслуговується електроприводом, економія здебільшого в кілька разів перевищує власне споживання електроенергії електроприводом.

Енергозбереження покращується також за рахунок підвищення якості ремонту електродвигунів, використання перемикання обмоток двигунів зі схеми «трикутника» на «зірку» у незавантажених двигунів, використання синхронних двигунів тощо.

Отже, у механізмах із частими пусками також є необхідність удосконалення електроприводів як із погляду енергозбереження, так і технологічного процесу та керованості.

Постановка завдання. Завданням дослідження є побудова структурно-математичної моделі асинхронного двигуна, а також додаткового обладнання для різних способів пуску в середовищі MATLAB/Simulink. Мета роботи – за допомогою побудованих моделей дослідити різні способи пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Виклад основного матеріалу. В електроприводах з асинхронними двигунами динамічні процеси описуються нелінійними рівняннями високого порядку [1–5; 7; 8; 13; 14; 15–20]. Для цього можна використати спрощений опис, а саме математичну модель асинхронного двигуна:

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{(\omega_{0el} - \omega_{del})U_\phi}{\omega_{0el}R'_{2\Sigma}(pT_e + 1)}; \\ \omega_\delta &= \frac{M_\delta - M_c}{pJ_\Sigma} \\ M_\delta &= \frac{3 p n \Gamma_p U_\phi}{\omega_{0el}} \\ \omega_\delta &= \frac{\omega_{del}}{p_n}, \end{aligned} \quad (1)$$

де I_p – значення струму ротора, приведене до обмотки статора, А; $\omega_{0el} = 2\pi f_1$ – кутова електрична частота обертання напруги мережі, рад/с; $\omega_{del} = p_n \omega_\delta$ – кутова електрична швидкість обертання ротора асинхронного двигуна, рад/с;

U_ϕ – фазна напруга живлення, В; $R'_{2\Sigma}$ – сумарний приведений активний опір кола ротора асинхронного двигуна, Ом; $T_e = \frac{1}{\omega_{0el} s_K}$ – електромагнітна стала асинхронного двигуна, с; ω_δ – поточне значення швидкості асинхронного двигуна, рад/с; M_δ – момент, який розвиває двигун, Н·м; M_c – момент навантаження, Н·м; p_n – кількість пар полюсів двигуна; $s_K = \frac{R'_{2\Sigma}}{x_K}$ – критичне ковзання двигуна.

Відповідно до системи рівнянь (1) на рис. 1 зображена структурна схема.

Вхідними величинами структурної схеми є: фазна напруга статора U_ϕ , частота напруги живлення статора f_1 і момент статичного навантаження M_c . Вихідні величини – приведений струм ротора I_p , електромагнітний момент M_δ та кутова швидкість асинхронного двигуна ω_δ .

Структурно-математичну модель з підставленими значеннями в середовищі MATLAB/Simulink зображено на рис. 2.

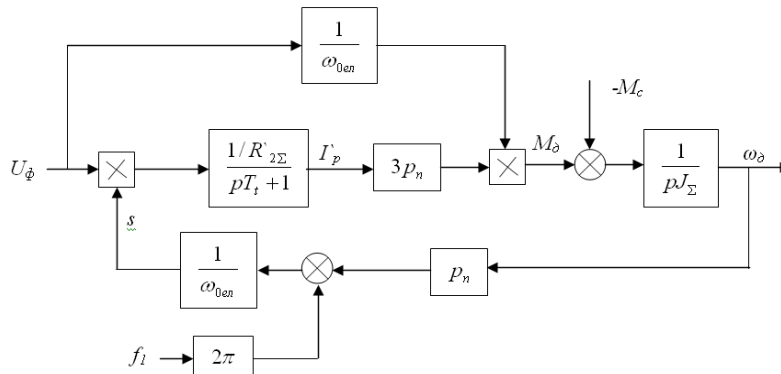


Рис. 1. Структурно-математична модель асинхронного двигуна

Fig. 1. Structural-mathematical model of an induction motor

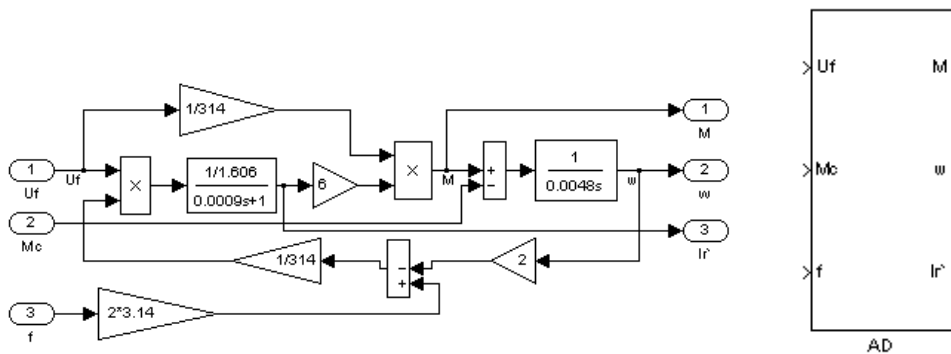


Рис. 2. Структурно-математична модель асинхронного двигуна з підставленими значеннями, представлена у вигляді підсистеми

Fig. 2. The structural and mathematical model of an induction motor with subtracted values is presented as a subsystem

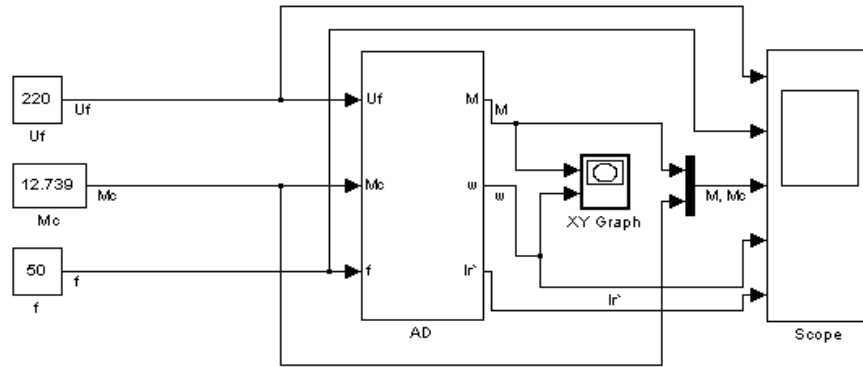


Рис. 3. Структурно-математична модель схеми для дослідження прямого пуску асинхронного двигуна

Fig. 3. Structural-mathematical model of the scheme for study of direct start of an induction motor

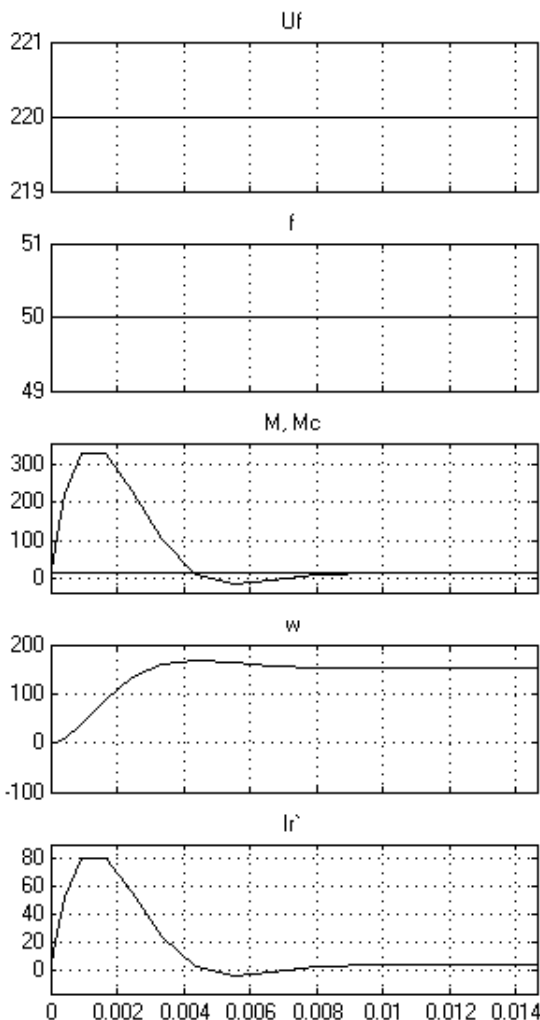


Рис. 4. Графічні залежності перехідних процесів при прямому пуску асинхронного двигуна

Fig. 4. Graphic dependencies of transients during direct start of an induction motor

Прямий пуск. Схема моделі при прямому пуску подана на рис. 3. На схемі зображено структурно-математичну модель асинхронного двигуна AD, джерело напруги U_f , В, джерело частоти напруги живлення f , Гц, момент статичного навантаження M_c , осцилоскоп, на якому контролюють входні величини, а також вихідні, момент, який розвиває двигун M , Н·м, кутову швидкість обертання двигуна w , рад/с, та струм ротора I_r , А. Пуск здійснюємо при номінальному навантаженні для всіх випадків. Час моделювання становить 1,5 с. У результаті моделювання отримано графічні залежності перехідних процесів (рис. 4).

Напруга, частота та момент статичного навантаження мають номінальні значення, а з отриманих графічних залежностей перехідних процесів видно, що пусковий момент сягає значення понад 300 Нм, присутнє певне перевищення швидкості асинхронного двигуна. При цьому струм ротора сягає 80 А. Швидкість досягає усталеного значення практично миттєво, за 0,009 с.

Перемикання «зірка-трикутник». Схема моделі зображена на рис. 5. Запуск передбачає зміну напруги живлення від меншої у $\sqrt{3}$ від номінальної напруги, з подальшим перемиканням на номінальну напругу живлення. Це перемикання реалізоване за допомогою блока Step, відбувається перемикання напруги з 127 В до 220 В.

Отримані графічні залежності перехідних процесів зображені на рис. 6.

Пуск асинхронного двигуна за цією схемою передбачає зменшення пускового моменту порівняно з прямим пуском. Під час пуску момент сягає значення близько 150 Нм, струм ротора – близько 60 А. При досягненні швидкості, близької до робочої, відбувається перемикання на номінальну напругу живлення. При цьому збільшуються момент і швидкість обертання, з подальшим досягненням усталених значень.

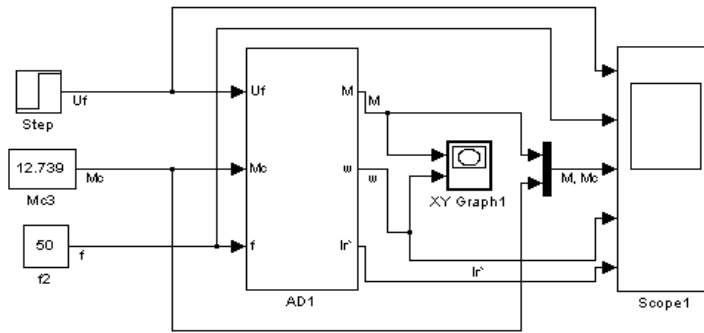


Рис. 5. Структурно-математична модель схеми для дослідження пуску асинхронного двигуна за схемою «зірка-трикутник»

Fig. 5. Structural-mathematical model of the scheme for study of the start of an induction motor according to the «star-triangle» scheme

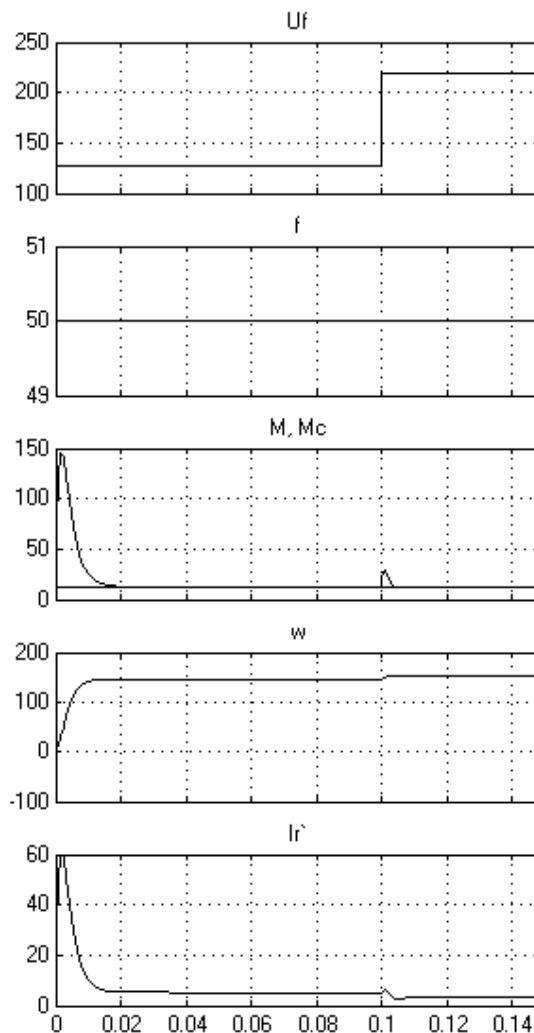


Рис. 6. Графічні залежності перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна при перемиканні за схемою «зірка-трикутник»

Fig. 6. Graphic dependencies of transient processes while starting an induction motor under switching according to the «star-triangle» scheme

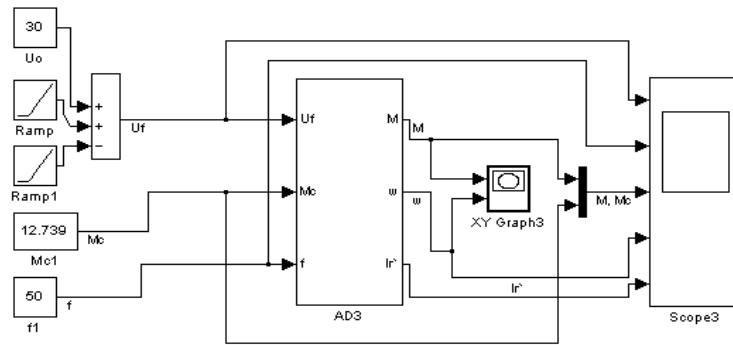


Рис. 7. Структурно-математична модель схеми для дослідження пуску асинхронного двигуна за допомогою пристрою плавного пуску

Fig. 7. Structural-mathematical model of the circuit for study of the start of an induction motor, using a soft start device

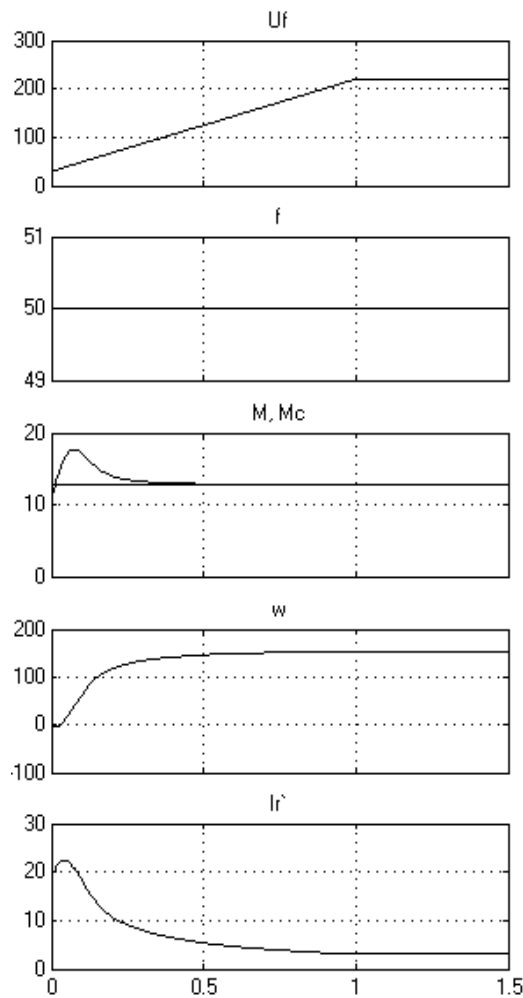


Рис. 8. Графічні залежності перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна за допомогою пристрою плавного пуску

Fig. 8. Graphic dependencies of transient processes while starting an induction motor with a soft start device

Пуск за допомогою пристрою плавного пуску. Пристрій плавного пуску наближено змодельований за допомогою таких елементів: блока Constant – U_0 , двох елементів Ramp та суматора (див. рис. 7).

Отримані графічні залежності перехідних процесів зображено на рис. 8.

З графіка зміни напруги видно, що напруга змінюється від 30 В до 220 В протягом однієї

секунди. Напруга починається не з нуля, оскільки в моделі момент навантаження активний і, щоб двигун не розганявся у протилежному напрямі, напруга починається не з нуля, а з 30 В. Пусковий момент становить близько 17 Нм, струм ротора трохи більший за 20 А, що є суттєво меншим від пуску за схемою перемикачання «зірка-трикутник» і ще меншим від прямого пуску. Швидкість досягає усталеного значення близько 0,8 с.

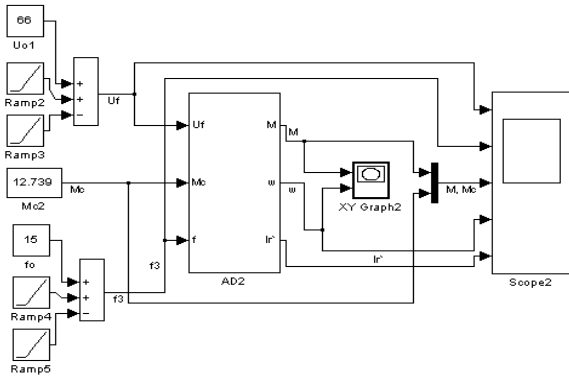


Рис. 9. Структурно-математична модель схеми для дослідження пуску асинхронного двигуна за допомогою перетворювача частоти

Fig. 9. Structural-mathematical model of the scheme for study of the start of an induction motor, using a frequency converter

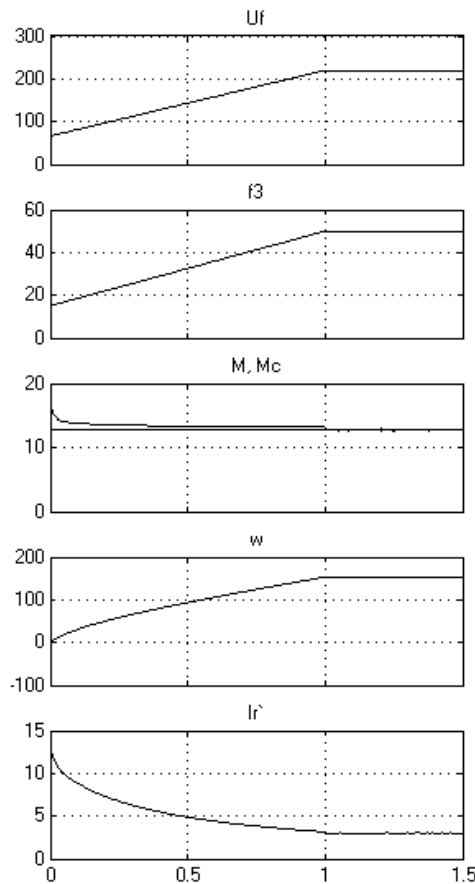


Рис. 10. Графічні залежності перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна за допомогою перетворювача частоти

Fig. 10. Graphic dependencies of transient processes while starting an induction motor, using a frequency converter

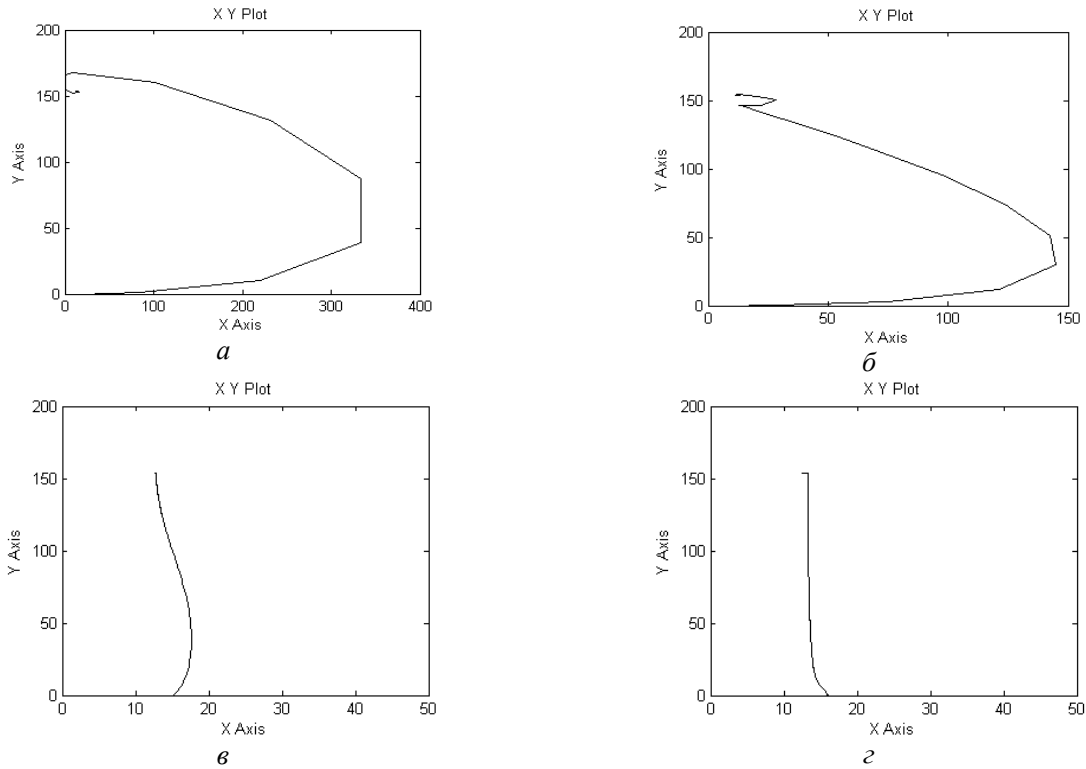


Рис. 11. Графічні залежності механічних характеристик асинхронного двигуна під час пуску: а) прямого; б) перемикання «зірка-трикутник»; в) з використанням пристрою плавного пуску; г) із перетворювачем частоти

Fig. 11. Charts of the mechanical characteristics of an induction motor during start-up: а) direct; б) switching the "star-triangle"; в) using a soft start device; г) with a frequency converter

Пуск за допомогою перетворювача частоти. Пуск за допомогою перетворювача частоти реалізований аналогічно до пуску з пристроєм плавного пуску асинхронного двигуна (див. рис. 9).

Окремо здійснюється регулювання напруги живлення та регулювання частоти мережі при збереженні сталого співвідношенні $U/f = 220/50 = 4,4 = \text{const}$. Сигнал напруги і частоти змінюється за заданою інтенсивністю протягом однієї секунди (див. рис. 10). Напруга при цьому змінюється від 66 до 220 В, а частота – від 15 до 50 Гц. Пусковий момент сягає значення близько 17 Нм, а струм ротора – близько 12 А. Швидкість досягає усталеного значення за одну секунду.

На рис. 11 зображено механічні характеристики $\omega(M)$ асинхронного двигуна під час різних способів пуску (ω , рад/с; M , Н·м): а – прямий пуск, б – пуск із перемиканням «зірка-трикутник», в – із пристроєм плавного пуску, г – плавний пуск із перетворювачем частоти.

Із розглянутих рисунків видно, що найбільший момент асинхронний двигун із короткозамкненим ротором розвиває під час прямого

пуску, а це означає найбільший пусковий струм, найбільше перевантаження мережі та великі механічні зусилля як у двигуні, так і у виконавчому органі робочої машини, окрім того, момент має коливний характер, що є недоліком.

При пуску з перемиканням «зірка-трикутник» максимальне значення моменту менше, ніж при прямому. Проте також завелике, отже, значення струму перевищує необхідне значення.

Під час пуску за допомогою пристрою плавного пуску та перетворювача частоти значення моменту значно менше, отже, ми отримуємо суттєве обмеження пускового струму, час пуску більший, але, власне, ми можемо його задавати.

Результати моделювання прямого пуску та пуску за схемою перемикання «зірка-трикутник» нам дали не цілком коректний результат, який можна трактувати як отримання великих значень пускового струму та коливного пускового моменту. Використана структурно-математична модель передбачає роботу двигуна на робочій ділянці механічної характеристики. При значеннях ковзання понад критичне результат наближений.

Висновки

У проведеному дослідженні побудовано структурно-математичну модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, а також додаткового обладнання для проведення досліджень різних способів пуску.

Після проведеного моделювання отримали графічні залежності перехідних процесів при прямому пуску, із перемиканням «зірка-трикутник», із використанням пристрою плавного пуску та перетворювачем частоти з лінійним законом керування.

Результати проведених досліджень засвідчують, що за допомогою технічних засобів, таких як пристрій плавного пуску та перетворювач частоти, можна отримати регульований й контрольований запуск асинхронного двигуна, а саме: регулювати час пуску, вводити обмеження, забезпечити регулювання чи домогтися певного значення моменту, пускового струму тощо. За допомогою перетворювача частоти можна отримати регульовану швидкість обертання асинхронного двигуна з різними законами керування.

Як бачимо з отриманих результатів моделювання, дана математична модель не підходить для дослідження прямого пуску асинхронного двигуна, оскільки вона здійснює моделювання робочої ділянки механічної характеристики асинхронного двигуна і отриманий результат перевищує реальні показники, проте для дослідження частотного регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна підходить.

Бібліографічний список

1. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. Москва: Высш. шк., 1965. 658 с.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Москва: Высш. шк., 1973. 658 с.
3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи. Москва: Гардарики, 2002. 536 с.
4. Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины. Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2003. 256 с.
5. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2001. 320 с.
6. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника. Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2007. 256 с.
7. Гречин Д. П., Герман А. Ф., Дробот І. М. Континуальна математична модель електромагнітного поля асинхронної машини із зубчатим феромагнітним ротором. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2016. № 20. С. 34–41.
8. Гречин Д. П., Дробот І. М., Герман А. Ф., Дубік В. М. Вплив розмірів паза ротора на величину пускового моменту короткозамкненого асинхронного двигуна. *Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету. Технічні науки*. 2016. № 24, ч. 2. С. 47–54.
9. Электропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній / Є. Л. Жулай та ін. Київ: Вища шк., 2001. 286 с.
10. Электропривод / О. С. Марченко та ін. Київ: Урожай, 1995. 208 с.
11. Закладний О. М., Праховник А. М., Соловей О. І. Энергозбереження засобами промислового електропривода: навч. посіб. Київ: Кондор, 2005. 408 с.
12. Ключев В. И., Терехов В. М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. Москва: Энергия, 1980. 360 с.
13. Мороз В. І., Паранчук Я. С., Костинюк Л. Д. Моделювання електроприводів. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2004. 404 с.
14. Соколова Е. М. Электрическое и электромеханическое оборудование. Москва: Мастерство, 2001. 224 с.
15. Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. В. А. Елисеєва, А. В. Шинянского. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 615 с.
16. Теорія електропривода / за ред. М. Г. Поповича. Київ: Вища шк., 1993. 495 с.
17. Чабан А. В., Левонюк В. Р., Дробот І. М., Герман А. Ф. Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 3. С. 30–35.
18. Чабан А. В. Принцип Гамільтона – Остроградського в електромеханічних системах. Львів: Вид-во Тараса Сороки, 2015. 488 с.
19. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. Санкт-Петербург: Питер, 2008. 288 с.
20. Маур О. Beitrage zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens. *Archiv fur Elektrotechnik*. 1943'37. Heft 12. S. 588–608.

Стаття надійшла 03.10.2019

ВПЛИВ КОНСТРУКЦІЇ ПУСКОРЕГУЛЮВАЛЬНОЇ АПАРАТУРИ СУЧАСНИХ СВІТЛОДІОДНИХ ЛАМП НА ЇХ РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Маркіян Гошко, к. т. н.

*Львівський національний аграрний університет,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл.,
Україна, e-mail: m121314@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.084>

Гошко М. Вплив конструкції пускорегулювальної апаратури сучасних світлодіодних ламп на їх робочі характеристики

Метою досліджень є вивчення впливу конструкції пускорегулювальної апаратури сучасних світлодіодних ламп на їх робочі характеристики.

З кожним роком питання енергозбереження та енергоефективності стають все актуальнішими. Цьому слугує низка причин, серед яких можна виділити: дефіцит енергоресурсів в Україні; зменшення природних ресурсів; зростання цін на імпорту енергоресурсів; щорічне збільшення споживання електрики.

Проблема заощадження енергії має глобальний масштаб. До 20 % загального електроспоживання в промисловості припадає на електроосвітлення. Одним зі способів підвищення енергоефективності є модернізація освітлення, зокрема використання сучасних світлодіодних ламп. На сьогодні є мало інформації про вплив конструкції пускорегулювальної апаратури сучасних світлодіодних ламп на їх робочі характеристики.

Тому було вирішено експериментально дослідити вплив конструкції пускорегулювальної апаратури сучасних світлодіодних ламп на їх робочі характеристики.

Досліджували світлодіодні лампи, представлені на ринку Західної України на той час, а саме марок «Philips», «Osram», «Feron», «Emiligh», «Іскра», «Aukes», «Hualin».

У результаті досліджень з'ясували, що найкраще тепловідведення є в лампах марок «Філіпс» та «Максус», у схемах яких присутні мікросхеми. Вони запускаються при більших напругах. Схеми, в яких є транзистори, запускаються при 140 В.

Такі виробники, як Хуалін, не використовують охолодження, ця лампа найдешевша з усіх досліджуваних і найлегша в ремонті.

У більшості ламп присутні RLC фільтри, що зменшує пульсацію на мікросхеми і на світлодіоди.

У результаті досліджень ми дійшли висновку, що багато світлодіодних ламп є неякісними та не завжди відповідають характеристикам, які зазначають виробники.

Ключові слова: світлодіодні лампи, конструкція пускорегулювальної апаратури, робочі характеристики.

Hoshko M. Influence of construction of starting and controlling equipment of modern LED lamps on their operating characteristics

The purpose of the research is to study the ignition design of starting and regulating equipment of modern LED lamps for their performance.

Every year, the issue of energy conservation and energy efficiency becomes more relevant. It is forced by a number of reasons, including: scarcity of energy resources in Ukraine; reduction of natural resources; rising prices for energy imports; annual increase in electricity consumption.

Thus, the problem of energy conservation is of global importance. Up to 20 % of the total electricity consumption in the industry comes from lighting. One way to improve energy efficiency is to upgrade lighting, including by the use of modern LED lamps. Nowadays, there is little information on the impact of lighted design of start-up and control devices of modern LED lamps on their performance.

Therefore, the research aims to make experimental investigation of the impact of the design of the PU regulators of modern LED lamps on their performance characteristics.

The research concerns LED lamps at the market of Western Ukraine. Objects of investigation include the Philips, Osram, Feron, Emiligh, Spark, Aukes, Hualin lamps. Completion of the investigated has supplied the following results.

The best heat sink is in the Phillips and Maxus lamps, which have chips in the circuits, and they are started at higher voltages. Circuits, containing transistors, are started at 140 V.

Such manufacturer as Hualin does not use cooling, and this lamp is the cheapest of all manufacturers, as well as the easiest to repair.

Most lamps have RLC filters that reduce ripple on the microcircuits and LEDs. Our experience shows that many LED lamps are of poor quality and do not always meet the specifications of the manufacturers.

Key words: LED lamps, design of starting-regulating equipment, performance.

Постановка проблеми. З кожним роком питання енергозбереження та енергоефективності стають все актуальнішими [1–5]. Цьому слугує низка причин, серед яких можна виділити:

- дефіцит енергоресурсів в Україні [6–8];
- зменшення природних ресурсів;
- зростання цін на імпорт енергоресурсів;
- щорічне збільшення споживання електрики [9–12].

Проблема заощадження енергії має глобальний масштаб. До 20 % загального електроспоживання в промисловості припадає на електроосвітлення [13–15; 20]. Одним зі способів підвищення енергоефективності є модернізація освітлення, зокрема використання сучасних світлодіодних ламп. На сьогодні є мало інформації про вплив конструкції пускорегулювальної апаратури сучасних світлодіодних ламп на їх робочі характеристики [16–19].

Тому ми вирішили експериментально дослідити вплив конструкції пускорегулювальної апаратури сучасних світлодіодних ламп на їх робочі характеристики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У літературі відсутні результати експерименталь-

них досліджень впливу конструкції пускорегулювальної апаратури сучасних світлодіодних ламп на їх робочі характеристики.

Постановка завдання. Метою досліджень є вивчення впливу конструкції пускорегулювальної апаратури сучасних світлодіодних ламп на їх робочі характеристики.

Виклад основного матеріалу. Досліджували світлодіодні лампи, представлені на ринку Західної України на той час, а саме марок «Philips», «Osram», «Feron», «Emiligth», «Іскра», «Aukes», «Hualin».

На рис. 1 зображено графіки залежності світловіддачі від напруги джерел світла марок «Philips», «Osram», «Feron», «Emiligth», «Іскра», «Aukes», «Hualin».

На рис. 2 подано графіки залежності потужності від напруги джерел світла марок «Philips», «Osram», «Feron», «Emiligth», «Іскра», «Aukes», «Hualin».

Після розрахунків ми порівняли потужність, вказану виробниками, із повною (див. табл.) за різних температур.

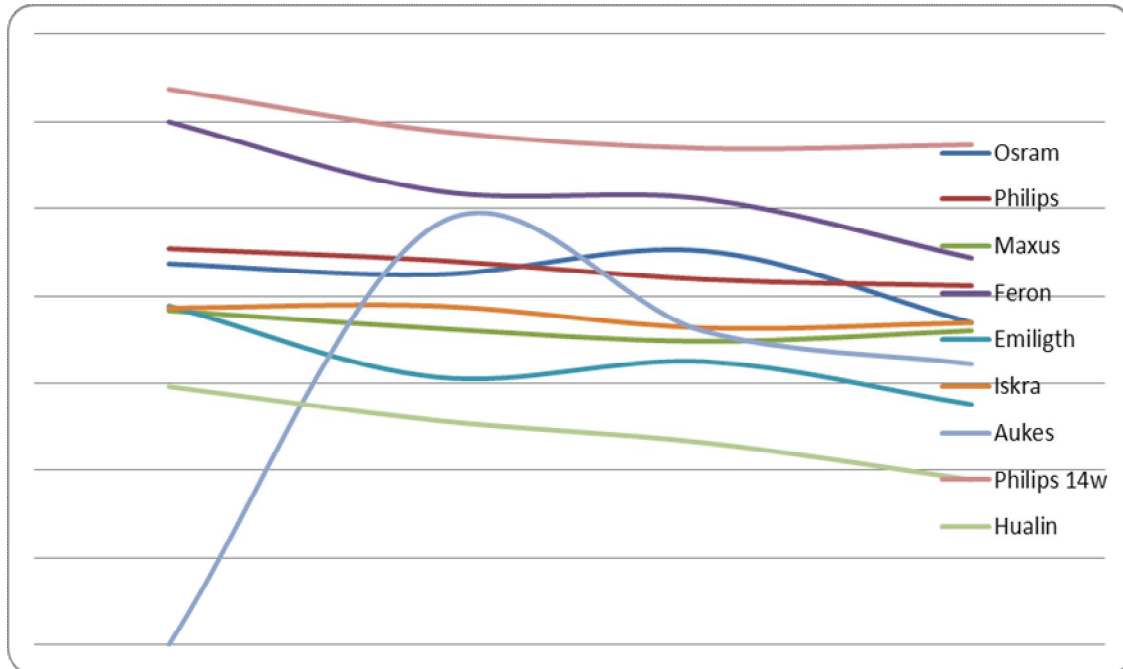


Рис. 1. Графічні залежності світловіддачі від напруги джерел світла марок «Philips», «Osram», «Feron», «Emiligth», «Іскра», «Aukes», «Hualin»

Fig. 1. Graphical dependences of light output on the voltage of light sources of brands «Philips», «Osram», «Feron», «Emiligth», «Spark», «Aukes», «Hualin»

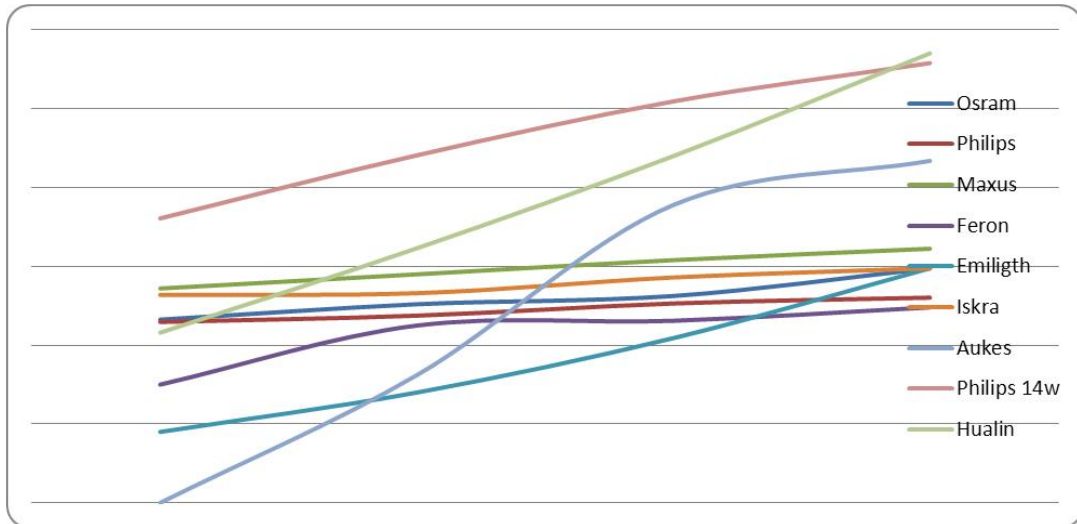


Рис. 2. Графічні залежності потужності від напруги джерел світла марок «Philips», «Osram», «Feron», «Emiligth», «Іскра», «Aukes», «Hualin»

Fig. 2. Graphical dependences of power on voltage of light source marks «Philips», «Osram», «Feron», «Emiligth», «Spark», «Aukes», «Hualin»

Таблиця. Порівняння вказаної та повної потужності джерел світла

Table. Comparison of specified and total power of light sources

Виробник	Подана потужність, Вт	Розрахована потужність, Вт
Philips	7	12,65
Osram	6,8	13,13
Feron	7	11,55
Emiligth	7	10,45
Іскра	8	14,3
Aukes	12	18,9
Philips	14	23,1
Hualin	9	22

Ці дані свідчать про те, що галогенні лампи «Delux» відповідають параметрам, що заявлені виробником (у межах 6 %). Натомість лампи «Lightferon» мають відхилення понад 30 %.

Будова та електричні схеми ламп

Лампа марки «Philips» (рис. 3).

Хороша фільтрація, використання мікросхеми замість транзистора, хороше тепловідведення. Ця електрична схема (див. рис. 3) нормально запускається при 170 В. У схемі є два RL фільтри: один для живлення мікросхеми, другий – для живлення світлодіодів. Мікросхема слугує для подачі оптимальної напруги на світлодіоди. Серед розглянутих ламп у неї найкраще тепловідведення та інший тип світлодіодів.

Лампа марки «Osram» (рис. 4).

У схемі (див. рис. 4) присутній гіс фільтр. Електрична схема нормально запускається при 90 В, оскільки в колі є транзистор Т1. У схемі є RLC

фільтр, що зменшує пульсацію світлодіодів.

Лампа марки «Feron» (рис. 5).

Ця електрична схема (див. рис. 5) нормально запускається при 150 В, оскільки в колі є транзистор Т1. У схемі є RLC фільтр, що зменшує пульсацію світлодіодів. Однак у схемі є 15 послідовно з'єднаних світлодіодів, що є недоліком.

Лампа марки «Іскра» (рис. 6).

Наведена електрична схема (див. рис. 6) нормально запускається при 130 В. Це зумовлене мікросхемою живлення WS3441, також у схемі є RLC фільтр, що зменшує пульсацію світлодіодів. У схемі є сім послідовно з'єднаних світлодіодів. На вході живлення стоїть RLC фільтр, що зумовлює стабілізацію і дає змогу подати правильну синусоїду на мікросхему WS3441. Ця лампа може нормально працювати при 248 В через обмежувальний резистор R6.

Лампа марки «Aukes» (рис. 7).

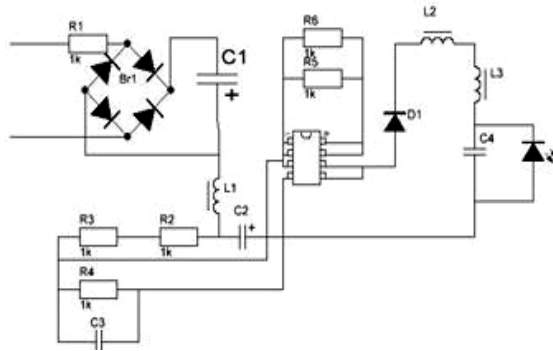


Рис. 3. Будова та електрична схема джерела світла «Philips»

Fig. 3. The structure and wiring diagram of the Philips light source

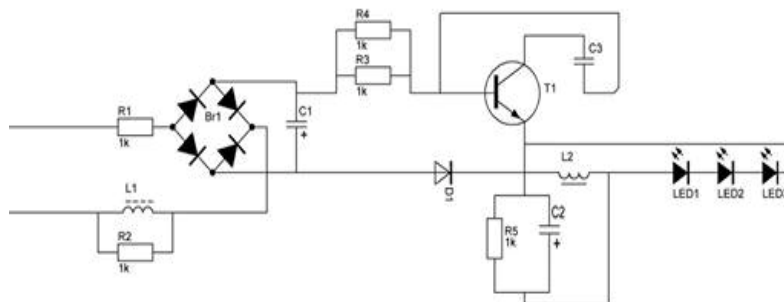


Рис. 4. Будова та електрична схема джерела світла «Osram»

Fig. 4. Structure and electrical diagram of the Osram light source

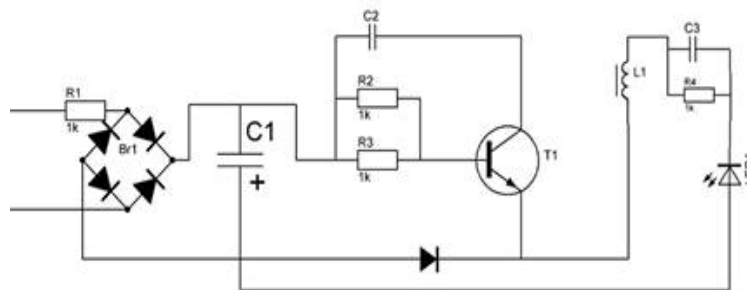


Рис. 5. Будова та електрична схема джерела світла «Feron»

Fig. 5. Structure and wiring diagram of Feron light source

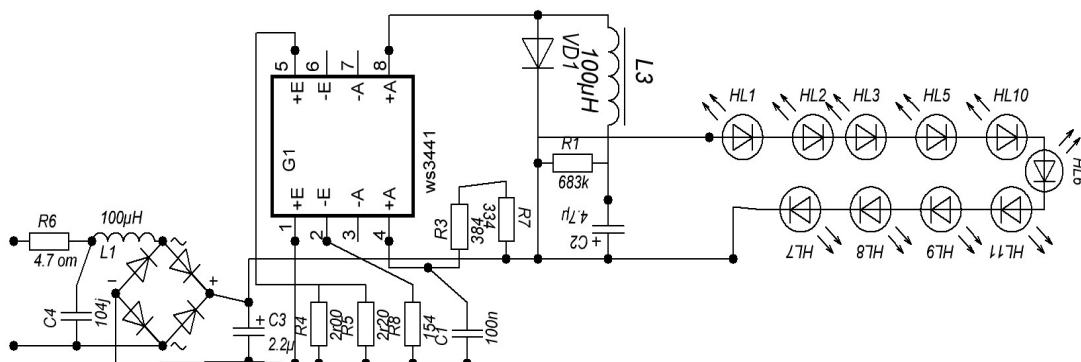


Рис. 6. Будова та електрична схема джерела світла «Іскра»

Fig. 6. The structure and the electrical scheme of the light source «Spark»

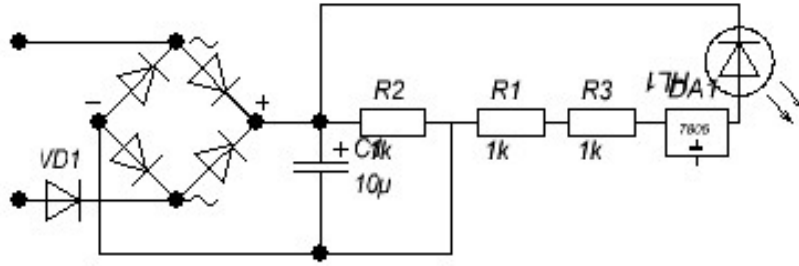


Рис. 7. Будова та електрична схема джерела світла «Aukes»

Fig. 7. Construction and electrical diagram of the Aukes light source

Електрична схема (див. рис. 7) нормально запускається при 180 В завдяки присутності у схемі мікросхеми 9 світлодіодів, увімкнених послідовно. Резистори R1 і R3 для спаду напруги присутні у RC фільтрі, що є недоліком, оскільки можлива пульсація на світлодіодах. Вхідний діод VD1 забезпечує зменшення пульсації на джерелі живлення.

Наведена схема є найдешевшою у виробництві, у ній можливі пульсуючі ефекти, оскільки на виході діодного моста зроблений поганий

фільтр. У схемі погане охолодження діодів.

Лампа марки «Hualin» (рис. 8).

Електрична схема (див. рис. 8) нормально запускається при 120 В і може працювати при 250 В. Це зумовлене послідовно з'єднаними 15 світлодіодами. Через кожен чотири світлодіоди увімкнені резистори. У схемі присутні два RC фільтри, що зменшують пульсацію. Недоліки схеми: залежність світловіддачі від напруги і погане тепловідведення від світлодіодів.

Лампа марки «Maxus» (рис. 9).

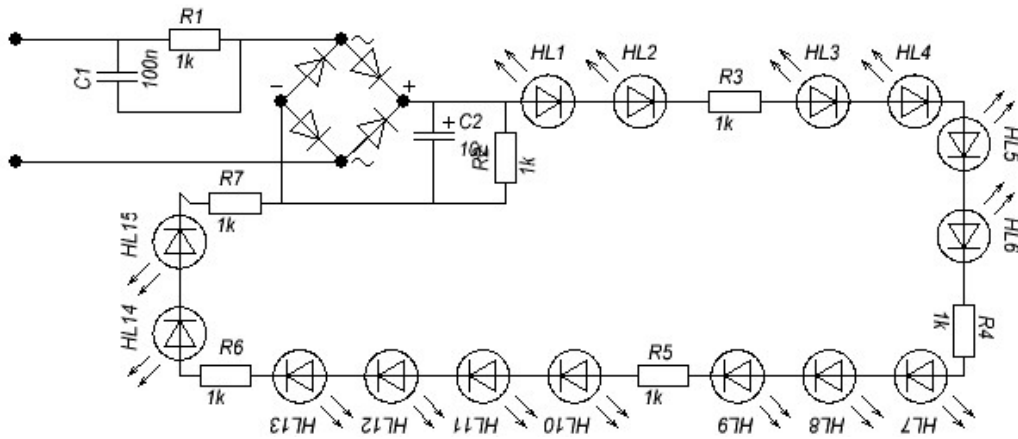


Рис. 8. Будова та електрична схема джерела світла «Hualin»

Fig. 8. Structure and electrical diagram of the Hualin light source

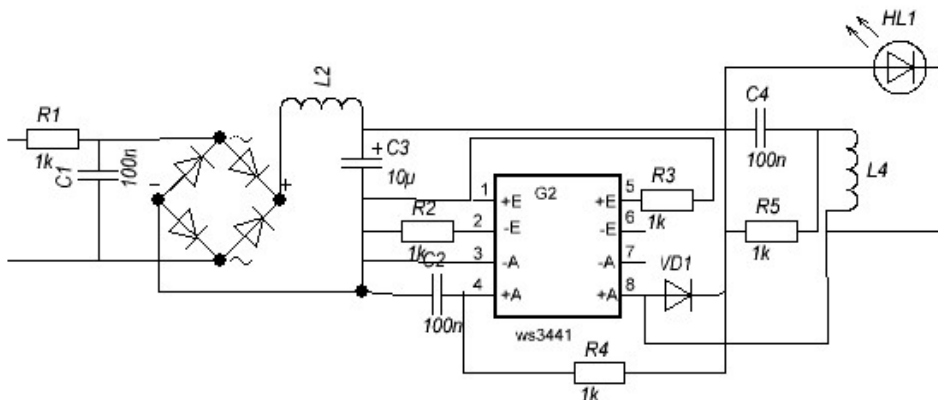


Рис. 9. Будова та електрична схема джерела світла «Maxus»

Fig. 9. Maxus Light Structure and Wiring Diagram

У наведеній схемі передбачено два фільтри живлення: один для живлення мікросхеми, другий для живлення світлодіодів. У фільтрі передбачені один конденсатор плівковий, одна котушка, один резистор. Ця електрична схема нормально запускається при 140 В. У схемі передбачено два RLC фільтри, один RC фільтр. Також при пуску мікросхема WS3441 і RC фільтр дозволяють зменшити пульсації на кожному рівні.

Висновки. Найкраще тепловідведення є в лампах марок «Філіпс» і «Максус», у схемах яких присутні мікросхеми, вони запускаються при більших напругах. Схеми, в яких є транзистори, запускаються при 140 В.

Такі виробники, як Хуалін, не використовують охолодження, однак ця лампа найдешевша серед ламп усіх досліджуваних виробників і найлегша в ремонті.

У більшості ламп наявні RLC фільтри, що зменшує пульсацію на мікросхеми і на світлодіоди.

Таким чином, наші дослідження свідчать, що багато світлодіодних ламп є неякісними та не завжди відповідають характеристикам, які зазначають виробники.

Бібліографічний список

1. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. Москва: Высш. шк., 1965. 658 с.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Москва: Высш. шк., 1973. 658 с.
3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи. Москва: Гардарики, 2002. 536 с.
4. Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины. Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2003. 256 с.
5. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2001. 320 с.
6. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника. Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2007. 256 с.
7. Гречин Д. П., Герман А. Ф., Дробот І. М. Континуальна математична модель електромагнітного поля асинхронної машини із зубчатим феромагнітним ротором. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2016. № 20. С. 34–41.
8. Гречин Д. П., Дробот І. М., Герман А. Ф., Дубік В. М. Вплив розмірів паза ротора на величину пускового моменту короткозамкненого асинхронного двигуна. *Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету. Технічні науки*. 2016. № 24, ч. 2. С. 47–54.
9. Электропривод сельскогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній / Є. Л. Жулай та ін. Київ: Вища шк., 2001. 286 с.
10. Электропривод / О. С. Марченко та ін. Київ: Урожай, 1995. 208 с.
11. Закладний О. М., Праховник А. М., Соловей О. І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: навч. посіб. Київ: Кондор, 2005. 408 с.
12. Ключев В. И., Терехов В. М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. Москва: Энергия, 1980. 360 с.
13. Мороз В. І., Паранчук Я. С., Костинюк Л. Д. Моделювання електроприводів. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2004. 404 с.
14. Соколова Е. М. Электрическое и электро-механическое оборудование. Москва: Мастерство, 2001. 224 с.
15. Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. В. А. Елисеєва, А. В. Шинянского. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 615 с.
16. Теорія електропривода / за ред. М. Г. Поповича. Київ: Вища шк., 1993. 495 с.
17. Чабан А. В., Левонюк В. Р., Дробот І. М., Герман А. Ф. Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 3. С. 30–35.
18. Чабан А. В. Принципи Гамільтона-Остроградського в електромеханічних системах. Львів: Вид-во Тараса Сороки, 2015. 488 с.
19. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. Санкт-Петербург: Питер, 2008. 288 с.
20. Mayr O. Beiträge zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens. *Archiv für Elektrotechnik*. 1943'37. Heft 12. S. 588–608.

Стаття надійшла 04.10.2019

ДОСЛІДЖЕННЯ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ НАПРУГ У РОЗПОДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ 0,38/0,22 кВ

Олександр Мірошник, д. т. н.

*Харківський національний технічний університет сільського господарства
ім. П. Василенка,
вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, e-mail: omiroshnyk@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.090>

Мірошник О. Дослідження симетричних складових напруг у розподільній мережі 0,38/0,22 кВ

У статті розглянуто проблему несиметричних режимів у мережах 0,38/0,22 кВ. Аналіз показав, що несиметрія струмів зумовлена роботою комунально-побутового навантаження, основну частину якого складають нерівномірно розподілені по фазах однофазні електроприймачі. Визначення величини несиметрії в мережі дозволяє уточнити рівень втрат електроенергії. В окремих Обленерго втрати в мережах 0,38/0,22 кВ сягають до 15 % від відпущеної електроенергії в мережу, а показники якості електроенергії перевищують допустимі значення у 2–4 рази. В європейських країнах вважається, що якщо втрати електроенергії перевищують 7–9 %, то така передача електричної енергії є неефективною. Тому виникла необхідність розробки нових методів та заходів щодо покращання показників якості електричної енергії та застосування відповідних заходів для зниження втрат.

Сучасний рівень комп'ютерної техніки дозволяє в реальному часі виконувати обчислення цих втрат, тому виникає необхідність створити математичний апарат, який ляже в основу програмного продукту з розрахунку несиметрії в мережах 0,38/0,22 кВ. Запропоновано матричний метод розрахунку симетричних складових напруги мережі 0,38/0,22 кВ, який може бути покладений в основу математичного апарату для розробки програмного продукту з розрахунку несиметрії напруг. Показано, що в системі симетричних координат відповідні матриці струмів і напруг містять складові прямої, зворотної та нульової послідовностей. Також досліджено, що опір прямої і нульової послідовностей трифазної лінії знаходиться розрахунковим або дослідним шляхом, причому опори прямої і зворотної послідовностей для ліній однакові, а опір нульової послідовності може в 2-3 рази перевищувати опір прямої послідовності. Це зумовлено різницею величин е.р.с. взаємної індукції, що наводяться у фазі струмами прямої та нульової послідовностей, що протікають по двох інших фазах.

Ключові слова: несиметрія струмів, несиметрія напруги, втрати електричної енергії.

Miroshnyk O. Research of symmetric components of voltage in the distribution network 0,38 / 0,22 kV

The article deals with the problem of asymmetrical modes in 0,38 / 0,22 kV networks. It is shown that the asymmetry of the currents is caused by the work of communal-household load, the main part of which is unevenly distributed in the phases of single-phase electric receivers. Determining the amount of asymmetry in the network allows specifying of the level of electricity losses. In some electricity companies, losses in the 0,38 / 0,22 kV networks reach up to 15 % of the electricity supplied to the grid, and the electricity quality indicators exceed the allowable values by 2 – 4 times. In European countries, it is considered that if electricity losses exceed 7 – 9 %, then such electricity transmission is considered inefficient. Therefore, it became necessary to develop new methods and measures to improve the quality of electricity and to take appropriate measures to reduce losses.

The research proposes a mathematical method for calculating the symmetric components of the 0,38 / 0,22 kV network voltage, which can be the basis of a mathematical apparatus for developing of a software product, designed for calculation of voltage asymmetry. It is shown that in the system of symmetric coordinates the corresponding current and voltage matrices contain components of forward, reverse and zero sequences. It was also investigated that the resistance of the straight and zero sequences of the three-phase line is calculated or experimentally studied, with the resistance of the forward and reverse sequences for the lines being the same, and the resistance of the zero sequence can be 2-3 times greater than the resistance of the direct sequence. It is caused by the difference in the values of the emf mutual induction, induced in the phase by currents of direct and zero sequences flowing in the other two phases.

Key words: current asymmetry, voltage asymmetry, loss of electrical energy.

Постановка проблеми. Проблема поліпшення якості та зменшення додаткових втрат електричної енергії, викликаних відхиленням показників якості електричної енергії від допустимих значень, є актуальною в сільських електричних мережах напругою 0,38/0,22 кВ. Аналіз

режимів роботи сільських мереж напругою 0,38/0,22 кВ [1; 2; 4; 6] показав, що несиметрія струмів зумовлена роботою комунально-побутового навантаження, основну частину якого становлять нерівномірно розподілені за фазами однофазні електроприймачі. Тому знання вели-

чини несиметрії в мережі дає змогу уточнити рівень втрат електроенергії та застосувати відповідні заходи щодо їх зниження. Сучасний рівень комп'ютерної техніки дозволяє в реальному часі виконувати обчислення цих втрат, тому виникає необхідність створити математичний апарат, який ляже в основу програмного продукту з розрахунку несиметрії в мережах 0,38/0,22 кВ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Підвищення якості електроенергії можна домогтися різними способами і засобами [1; 2; 6]. При цьому кожен із них має свої переваги й недоліки. Наприклад, застосуванням такого способу, як перерозподіл однофазних навантажень, не вдається мінімізувати випадкову несиметрію струмів (хоча додаткові втрати потужності знижуються на 15–20%). До того ж випадкова несиметрія струмів характеризується імовірнісним режимом роботи приєднаних однофазних приймачів і є постійно діючим фактором у мережах 0,38 кВ навіть за однакової сумарної потужності фаз.

Прагнення до скорочення протяжності розподільних мереж може призвести до їх формування як розгалужених радіальних мереж. Такі мережі, як відомо, мають низку особливостей. По-перше, струмові навантаження однієї і тієї ж лінії, наприклад, на початку її і в кінці, досить різні, що може призводити до ускладнень налаштування чутливості захисту розподільних мереж від коротких замикань. По-друге, істотно відрізняються між собою значення напруги в різних точках мережі, що є однією з основних причин, які ускладнюють завдання забезпечення належної якості електричної енергії у споживачів.

На сьогодні несиметричні режими роботи сільських розподільних мереж 0,38 кВ вивчені не повною мірою у зв'язку з труднощами, що виникають під час експериментальних досліджень у діючих мережах, і відсутністю сучасних методів розрахунку цих режимів [3; 4; 5; 7].

Розрахунок розподілу симетричних складових напруг розгалуженої розподільної мережі 0,38/0,22 кВ досить складний [3; 5; 7; 11; 13]. Обчислення параметрів усієї мережі або її частини до розрахункової точки вкрай громіздке і пов'язане, як правило, з необхідністю виконання операцій з великою кількістю матриць. Тому розв'язання задачі за допомогою ручного рахунку навіть для відносно нескладних схем вимагає значних затрат праці й часу.

Постановка завдання. Наше завдання – визначити в загальному вигляді межі розподілу

значень симетричних складових напруг мережі 0,38/0,22 кВ за несиметричного режиму навантаження.

Виклад основного матеріалу. Широке впровадження комп'ютерної техніки висуває вимогу розробки й застосування таких методів розрахунку, які, незважаючи на можливу громіздкість арифметичних операцій, були б достатньо простими в розв'язанні задачі в загальному вигляді і давали б максимальну циклічність рахунку.

Виходячи з цього розглянуто можливість застосування для розв'язання цієї задачі методу вузлових потенціалів.

У загальному вигляді рівняння методу вузлових потенціалів у матричній формі має вигляд [1; 8; 10; 12; 16]:

$$\mathbf{YU} = \mathbf{I} \quad (1)$$

або

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де \mathbf{Y} – матриця вузлових провідностей; \mathbf{U} – вектор вузлових потенціалів; \mathbf{I} – вектор струмів незалежних еквівалентних вузлових джерел.

Матриці струмів та напруг у будь-якій точці мережі мають фазні значення [4; 6]:

$$\dot{\mathbf{U}} = \begin{pmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{pmatrix}; \quad \dot{\mathbf{I}}_s = \begin{pmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{pmatrix}. \quad (3)$$

У системі симетричних координат відповідні матриці струмів і напруг містять складові прямої, зворотної та нульової послідовностей:

$$\dot{\mathbf{U}}_s = \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_0 \end{pmatrix}; \quad \dot{\mathbf{I}}_s = \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

З (2) напруга будь-якого вузла може бути отримана за правилом Крамера [6; 9; 14]:

$$\dot{U}_k = \frac{1}{\Delta} \sum \Delta_{ik} \dot{U}_{ik} Y_{ik}, \quad (5)$$

де Δ – визначник \mathbf{Y} -матриці провідностей; Δ_{ik} – алгебраїчне доповнення елемента Y_{ik} матриці провідностей.

Елементи Y -матриці з однаковими індексами (pp), що стоять на перетині p -ї стрічки та p -го стовпчика, являють собою провідності елементів схеми, які приєднані до вузла p . Елементи матриці з різними індексами (pq), що стоять на перетині p -ї стрічки та q -го стовпчика, являють собою провідності елементів схеми, що включені між вузлами p та q і взяті з від'ємним знаком.

У разі одностороннього живлення відповідно отримаємо [6; 15]:

$$\dot{U}_\kappa = \frac{1}{\Delta} \Delta_{1\kappa} \dot{U}_{ul} Y_{ul}. \quad (6)$$

Відносна напруга у вузлі κ :

$$\dot{U}_\kappa = \frac{U_\kappa}{U_{kl}} = \frac{\Delta_{1\kappa}}{\Delta} Y_{ul}. \quad (7)$$

Якщо мережа простої конфігурації, то матриця провідностей Y відносно легко записується за допомогою попередньої побудови схем заміщення або графіків. У разі мережі складної конфігурації стає доцільно процес запису матриці Y автоматизувати за допомогою комп'ютерних засобів. Беручи до уваги викладений принцип запису елементів матриці, алгоритм передбачає

формування її за заданими $Z_\kappa = r_\kappa + jx_\kappa$ – опорамі елементів мережі.

Опір прямої і нульової послідовностей трифазної лінії знаходять розрахунковим або дослідним способом, причому опори прямої і зворотної послідовностей для ліній однакові, а опір нульової послідовності може у 2-3 рази перевищувати опір прямої послідовності. Пояснюється це різницею величин е.р.с. взаємної індукції, що наводяться у фазі струмами прямої та нульової послідовностей, що протікають по двох інших фазах.

На рис. 1 показано графік симетричних складових струмів для несиметричного режиму, коли

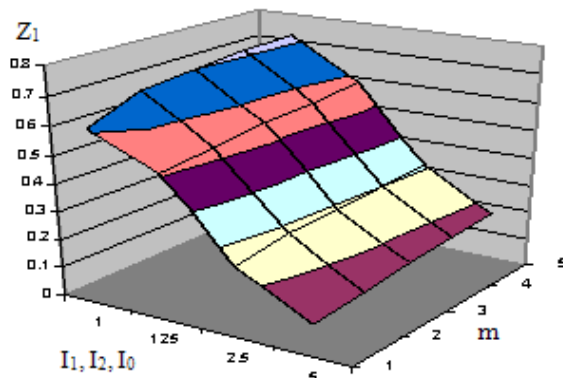
$$Z_A = Z \text{ і } Z_B = Z_C = \infty$$

у функції

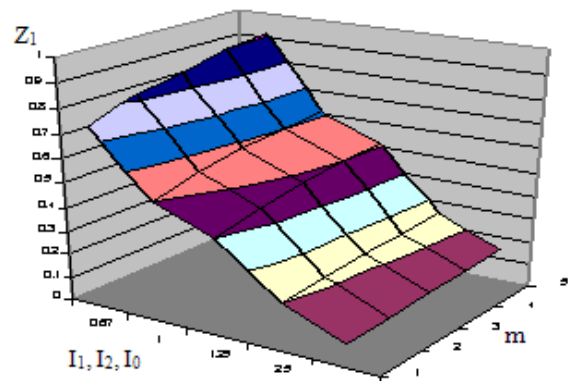
$$m = \frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}; n = \frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{0\Sigma}} \text{ і } Z_{1\Sigma},$$

де $Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$, $Z_{0\Sigma}$ – сумарні опори схем відповідно прямої, зворотної та нульової послідовностей.

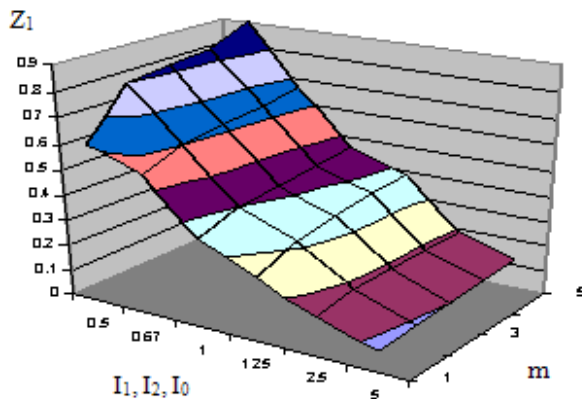
На рис. 2 показані графіки характеристик несиметричного режиму для випадку, коли $Z_A = \infty$ і $Z_B = Z_C$.



а) при $n = 0,3$



б) при $n = 0,5$



в) при $n = 1$

Рис. 1. Симетричні складові струмів у лінії в несиметричному режимі ($Z_A = Z$, $Z_B = Z_C = \infty$)

Fig. 1. Symmetrical components of currents in a line in asymmetric mode ($Z_A = Z$, $Z_B = Z_C = \infty$)

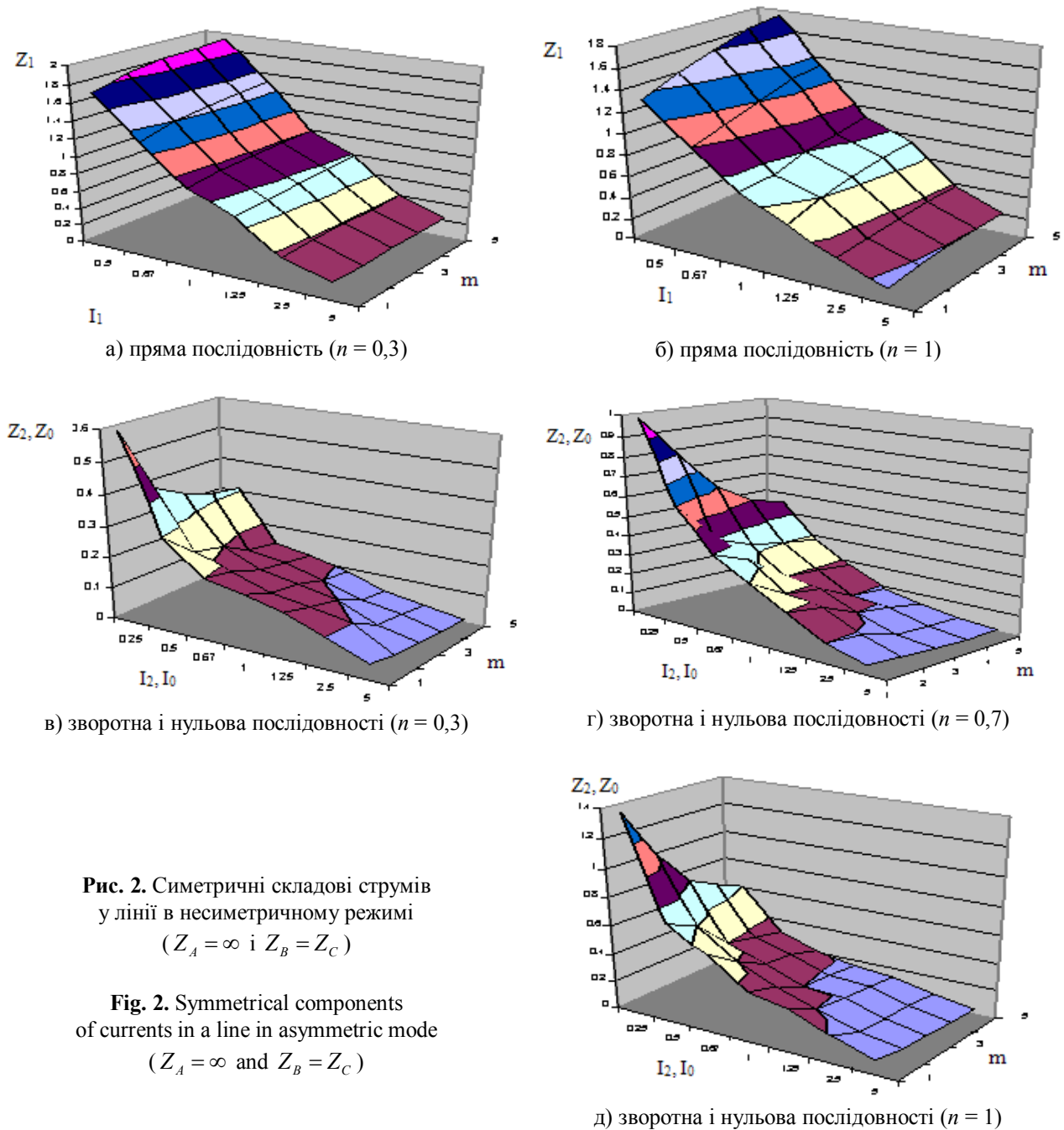


Рис. 2. Симетричні складові струмів у лінії в несиметричному режимі ($Z_A = \infty$ і $Z_B = Z_C$)

Fig. 2. Symmetrical components of currents in a line in asymmetric mode ($Z_A = \infty$ and $Z_B = Z_C$)

Висновки. Дослідження показали, що опори прямої і зворотної послідовностей для мережі 0,38/0,22 кВ однакові, а опір нульової послідовності може у 2-3 рази перевищувати опір прямої послідовності. Пояснюється це різницею величин е.р.с. взаємної індукції, що наводяться у фазі струмами прямої та нульової послідовностей, які протікають по двох інших фазах. Розроблений метод розрахунку розподілу симетричних складових напруги мережі 0,38/0,22 кВ може бути покладений в основу програмного продукту з розрахунку несиметричних режимів.

Бібліографічний список

1. Богатырев Л. Л., Манусов В. З., Содномдорж Д. Математическое моделирование режимов ЭЭС в условиях неопределенности. Улан-Батор: Изд-во типографии МГТУ, 1999. 348 с.
2. Левин М. С., Лещинская Т. Б. Анализ несимметричных режимов сельских сетей 0,38 кВ. *Электричество*. 1999. №5. С. 18–22.
3. Лежнюк П. Д., Бурыкин А. Б., Кулик В. В. Определение потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем от транзитных перетоков. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Спец. вип.: Енергетичні ринки – перехід до нової моделі ринку

- двосторонніх контрактів і балансуючого ринку. 2009. С. 31–36.
4. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Поліщук А. Л. Інформаційне забезпечення розрахунку втрат електроенергії в розподільних мережах. *Вісник ХНТУСГ «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. Вип. 57, т. 1. С. 17–21.
5. Мірошник О. О. Методи та підходи до розрахунку втрат електричної енергії в розподільчих електричних мережах. *Праці Таврійського державного аеротехнологічного університету*. Вип. 7, т. 3. С. 31–36.
6. Савина Н. В. Системный анализ потерь электроэнергии в электрических распределительных сетях : монография / отв. ред. Н. И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2008. 228 с.
7. Chitra R. Neelaveni R. A Realistic Approach for Reduction of Energy Losses in Low Voltage Distribution Network. *International Journal of Electrical Power & Energy System*. 2011. 33. P. 377–384. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.08.033>.
8. Dilek M., Broadwater R. P., Thompson J. C., Sequin R. Simultaneous Phase Balancing at Substations and Switches with Time-Varying Load Patterns. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2001. 16. P. 922–928. doi: <https://doi.org/10.1109/59.962447>.
9. Erturk A. T. Manufacturing of Al-Zr Thermal-Resistant Alloys for Transmission Lines. *Acta Physica Polonica*. 2017. No. 127. P. 1292–1294. doi: <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.1292>.
10. Faiz J., Ebrahimpour H. Influence of Unbalanced Voltage Supply on Efficiency of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor and Economic Analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2006. 47. P. 289–302. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.04.009>.
11. Faiz J., Ebrahimpour H. Precise Derating of Three-Phase Induction Motors with Unbalanced Voltages. *Energy Conversion and Management*. 2007. 48, P. 2579–2586. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.03.023>.
12. Karabay S. Enhancement on Al-Mg-Si Alloys against Failure Due to Lightning Arc Occurred Inenergy Transmission Lines. *Engineering Failure Analysis*. 2013. 31. P.153–160. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.02.005>.
13. Miroshnyk O., Trunova I., Savchenko O. The incentive scheme for maintaining or improving power supply quality. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2018 - Proceedings 2018-January*. 2018. P. 161–165. doi: [10.1109/IEPS.2018.8559553](https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559553).
14. 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. Issue 4. P. 67–73. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84885913005&partnerID=MN8TOARS> (Last accessed: 15 September 2019).
15. Tavakoli Bina M., Kashefi A. Three-Phase Unbalance of Distribution Systems: Complementary Analysis and Ex-perimental Case Study. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2011. No. 33. P. 817–826. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.12.003>.
16. Thyristor Converter as a Means of Upgrading the Single-Phase Furnace. URL: <http://www.elec.ru/articles/tiristornyj-preobrazovatel-kak-sredstvo-modernizac/> (Last accessed: 15 September 2019).

Стаття надійшла 21.09.2019

ОПТИМІЗАЦІЯ ІМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ГАЛЬМУВАННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Олександр Возняк, к. т. н., Микола Колісник, асистент

*Вінницький національний аграрний університет,
вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, e-mail: kolisnik30@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.095>

Возняк О., Колісник М. Оптимізація імпульсного регулювання гальмування двигуна постійного струму

Розглянуто умови оптимізації гальмівних режимів двигуна постійного струму (ДПС). Під час гальмування забезпечується мінімізація рівня пульсацій струму гальмування за використання широтно-імпульсного, частотно-імпульсного і релейного регулювання струму.

Проблеми ефективного енерговикористання та створення безпечних режимів роботи тягового двигуна постійного струму вирішено за допомогою контролю оптимального режиму.

На сьогодні в електротранспорті використовують тягові електроприводи з електродвигунами постійного струму. Сфера застосування електроприводів постійного струму (ЕПС) з двигунами послідовного збудження (ДПЗ) достатньо широка та є основою рухомого складу міського й залізничного транспорту. Для таких механізмів з нелінійною робочою характеристикою найкраще підходять ДПС з експоненційно спадною механічною характеристикою.

Підвищення ефективності роботи електротранспорту в цілому може бути забезпечене заміною існуючої системи керування електроприводами більш сучасною, на базі імпульсного регулювання.

Введення в схеми додаткових елементів дозволяє знизити швидкість затухання струму в гальмівних обмотках.

Запропонована модернізація схем полягає у введенні в схему діодів, що дозволить використати самозбудження електродвигуна для електричного гальмування.

Запропоноване рішення дає змогу спростити технічну реалізацію і зменшити витрати через відсутність додаткового незалежного джерела живлення гальмівних обмоток.

Таким чином, оптимізація режимів гальмування двигунів постійного струму, зокрема за використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), є можливою в разі введення проміжного накопичувача енергії та додаткового споживача. Безпечні режими електропривода і електромережі реалізуються та забезпечуються при різких змінах параметрів і стану мережі живлення та електропривода.

Ключові слова: оптимізація, імпульсне регулювання, двигун постійного струму.

Vozniak A., Kolisnyk M. Optimization of pulse controlling of engine stopping

The research considers conditions of optimization of braking modes of the DC motor. While braking, the pulsation level of the braking current is minimized by the use of pulse width, frequency ulse and relay current regulation.

The optimal mode control supplies solution of the problems of energy efficiency and creates safe modes for DC traction motor control.

At present, traction electric motors with DC motors are used in electric transport. The field of application of direct current drive (DCD) motors with serial excitation motors (SEM) is wide enough and is the basis of rolling stock of urban and rail transport. The SEMs with exponentially decreasing mechanical characteristics are best for such mechanisms with nonlinear operating.

Efficiency of electric transport in general can be increased by replacement of the existing drive control system with more advanted ones, based on impulse control.

The introduction of additional elements in the scheme allows reducing of the rate of attenuation of the current in the brake coils.

Introduction of diodes in the circuit can provide a significant advantage of the proposed circuit modernization, which enables using of self-excitation of the electric motor for electrical braking.

The proposed solution simplifies technical implementation and reduces costs due to the absence of an additional independent power source of the brake coils.

Thus, optimization of the braking modes of DC motors, in particular by using pulse width modulation (PWM), is possible due to introduction of an intermediate energy storage device and an additional consumer. Safe modes of electric drive and power supply are realized and provided with crucial changes of parameters and conditions of the power supply network and electric drive.

Key words: optimization, impulse control, DC motor.

Постановка проблеми. У системах електропривода постійного струму, особливо на електротранспорті, для гасіння механічної енергії двигуна постійного струму (ДПС) нарівні з механічними засобами гальмування широко використовують і електричні види гальмування: електродинамічне, коли енергія передається до баластного опору, і рекуперативне – з передаванням енергії до мережі або до іншого споживача в цій мережі. Введення імпульсного регулювання в процес гальмування дає змогу за рахунок зміни параметрів імпульсів керування: періоду T , часу імпульсу t_i і часу паузи t_n – встановити оптимальний режим гальмування, найчастіше забезпечити постійний струм гальмування I_0 [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задача імпульсного регулювання під час гальмування ДПС частково розглянута в [1; 2]. Оптимізація цієї задачі є важливою для побудови ефективних алгоритмів керування ДПС з високою точністю та швидкодією [3; 5].

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження динаміки ДПС послідовного збудження з імпульсним регулюванням частоти обертання і визначення можливості спрощення схеми електропривода.

Розробка математичного апарату для оптимізації імпульсного регулювання ДПС під час гальмування та дослідження його режиму роботи є актуальним завданням.

Виклад основного матеріалу. Спрощену еквівалентну схему ДПС і мережі під час гальмування подано на рис. 1.

На цій схемі ДПС представлений еквівалентною індуктивністю L , опором втрат r_0 і джерелом ЕРС E , яка залежить від типу двигуна й кількості обертів N та розраховується за формулою

$$E = C_e * N\Phi, \quad (1)$$

де C_e – конструктивний коефіцієнт; Φ – магнітний потік.

Ключ S і діод $VD1$ утворюють імпульсний комутатор K , який разом із ДПС створюють перетворювач з підвищенням напруги. У багатьох випадках живлення ДПС здійснюється від мережі змінного струму e_m через випрямляч $VD2$ з внутрішнім опором r_i , які щодо мережі M є джерелом вторинного живлення (ДВЖ). За використання багатофазних випрямлячів і живлення потужних ДПС ємність C на виході випрямляча не встановлюють, тому в простішому випадку мережа та її споживачі можуть бути представлені еквівалентним опором Z_H , а за наявності тільки споживачів – активним опором R_H . Таке спрощення дає змогу також розглянути режим електродинамічного гальмування в разі виключення зі схеми ДВЖ.

Потрібне значення струму гальмування I_0 , а відповідно й механічного моменту M_0 встановлюють часом замикання t_i ключа S :

$$i_0(t) = I(0) + I_{mm} e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)}, \quad (2)$$

де $I_{mm} = E/(r_0 + r_s)$ – максимальний струм ДПС при фіксованому N ; $\tau = L/(r_0 + r_s)$ – еквівалентна стала часу кола «ДПС – ключ».

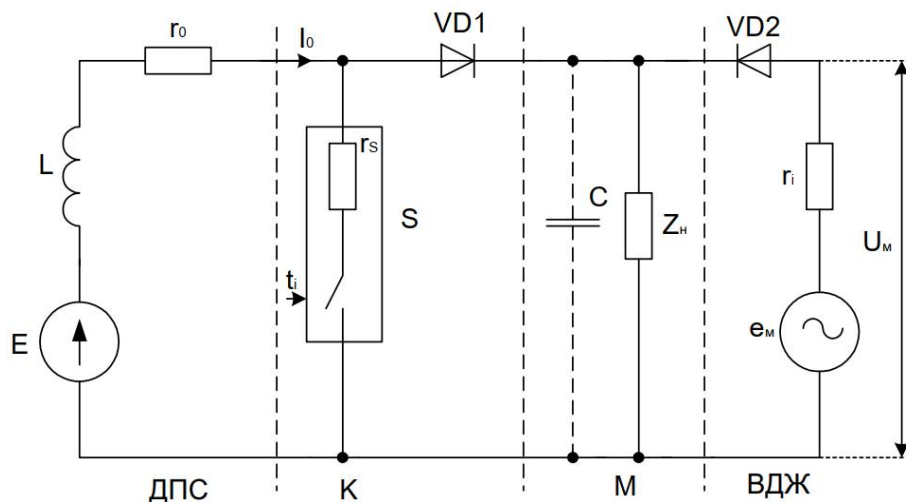


Рис. 1. Еквівалентна схема ДПС і мережі під час гальмування

Fig. 1. Equivalent circuit of DC motor and network during braking

За умови, що за час регулювання t_i кількість обертів N не змінюється, на обмотках ДПС і ключі втрачається частина енергії W_i , яку розраховують за формулою

$$W_i = I_0^2 (r_0 + r_s) t_i = I_0^2 r t_i, \quad (3)$$

де $r = (r_0 + r_s)$ – еквівалентний опір втрат ДПС і ключа.

Під час паузи ключ S розімкнутий і струм I_0 двигуна замикається через опір навантаження R_H . При живленні від ДВЖ за рахунок зростання проти ЕРС індуктивності L діоди випрямляча VD2 замкнені і струм також замикається через опір споживачів R_H . Вважаючи, що внутрішній опір діода VD1 і ключа r_s приблизно однакові, можна визначити енергію, яку втрачає двигун під час паузи:

$$W_{\Pi} \approx I_0^2 r t_{\Pi} + I_0^2 R t_{\Pi} = W_{r\Pi} + W_R, \quad (4)$$

де W_{Π} – енергія, яка втрачається на ДПС і ключі VD1.

Ефективність гальмування визначимо максимумом енергії двигуна, яка передається до навантаження, тобто коефіцієнтом рекуперації, який можна визначити за формулою

$$\eta = W_R / (W_i + W_{r\Pi} + W_R) = R_H t_{\Pi} / (r(t_i + t_{\Pi}) + R_H t_{\Pi}), \quad (5)$$

Максимальному значенню коефіцієнта η відповідає опір навантаження R_H , який значно перевищує внутрішній опір ДПС, коли практично вся енергія передається до навантаження.

Але в такому разі різко зростає ЕРС, а відповідно й напруга на навантаженні, що призводить до аварійних режимів для самого ДПС, для систем його керування, споживачів і діодів ДВЖ.

При узгодженні опору ДПС і опору навантаження під час паузи до навантаження передається половина енергії двигуна, а саме:

$$W_{r\Pi} = W_R = I^2 r t_{\Pi}, \quad (6)$$

але значення коефіцієнта рекуперації η можна визначити за формулою

$$\eta = r t_{\Pi} / (r(t_i + r_{\Pi}) + r t_{\Pi}) = (1 - \gamma) / (2 - \gamma), \quad (7)$$

де $\gamma = t_i / (t_i + t_{\Pi})$ – коефіцієнт заповнення, який не перевищує 0,5, тільки коли ДПС постійно підключений до мережі і її стан не змінюється.

Такому режиму притаманна нестабільність струму гальмування I через його поступове спадання. Необхідність підтримки постійним середнього значення струму вимагає здійснювати періодичну комутацію ключа S , і коефіцієнт γ вже відрізняється від нуля, а відповідно й коефіцієнт рекуперації η стає меншим від 0,5.

Вирівнювання енергії втрат W_2 і рекуперації WR за період $T = (t_i + t_{\Pi})$ можливе, якщо:

$$\begin{cases} I_0^2 r T = I_0^2 R_H t_{\Pi} = I_0^2 R_H (1 - \gamma) T; \\ R_H = r / (1 - \gamma). \end{cases} \quad (8)$$

Значення коефіцієнта η становить 0,5. Тобто при постійному навантаженні R_H і виборі коефіцієнта заповнення буде

$$\gamma_p = 1 - r / R, \quad (9)$$

за широтно-імпульсною модуляції (ШІМ) можлива передача половини енергії двигуна до інших споживачів. Період T ШІМ визначатиметься часом t_i встановлення необхідного рівня струму I_m гальмування (2). За умови, що стала часу двигуна τ значно більша від тривалості імпульсу формула (2) набуде такого вигляду:

$$i_0(t) \approx I(0) + \Delta I_m t_i / \tau, \quad (10)$$

де $\Delta I_m = I_{mm} - I(0)$ – максимальний приріст струму на інтервалі комутації.

Значення приросту струму ΔI визначається з допустимого рівня пульсації струму гальмування I_0 . Звідси можна визначити тривалість імпульсу t_i :

$$t_i = \tau \Delta I / \Delta I_m, \quad (11)$$

і, відповідно, період ШІМ, за якого до мережі передається половина енергії ДПС:

$$T_p = t_i / \gamma_p = \frac{\tau (\Delta I / \Delta I_m)}{(1 - r / R)}. \quad (12)$$

Такі умови на практиці важко реалізувати, тому що стан мережі постійно змінюється і для підтримання рівня пульсацій у допустимих межах необхідно забезпечити тривалість паузи такою, щоб приріст струму ΔI_+ і його зменшення ΔI_- збігалися на інтервалі T_1 (рис. 2).

Додатний приріст визначається за формулою

$$\Delta I_+ = I_0 (1 + \delta) \approx \Delta I_m t_i / \tau. \quad (13)$$

Від'ємний –

$$\Delta I_- = I_0 (1 - \delta) \approx \Delta I_m t_{\Pi} / \tau_e, \quad (14)$$

де δ – відносне значення допустимих пульсацій.

Порівнявши прирости й позначивши відношення значення максимального струму гальмування I_{mm} до середнього значення I_0 як коефіцієнт K_i , отримаємо:

$$[K_i - (1 - \delta)] t_i / \tau = (1 + \delta) t_{\Pi} / \tau_e, \quad (15)$$

тоді тривалість паузи, за якої частота пульсацій збігатиметься з частотою комутації при фіксованому опорі навантаження, визначимо так:

$$t_{\Pi} = t_i \frac{(K_i - 1 + \delta)}{1 + \delta} * \frac{\tau_e}{\tau} \approx t_i (K_i - 1) \frac{\tau_e}{\tau}, \quad (16)$$

приблизному співвідношенню відповідає малий рівень пульсацій, $\delta \gg 1$.

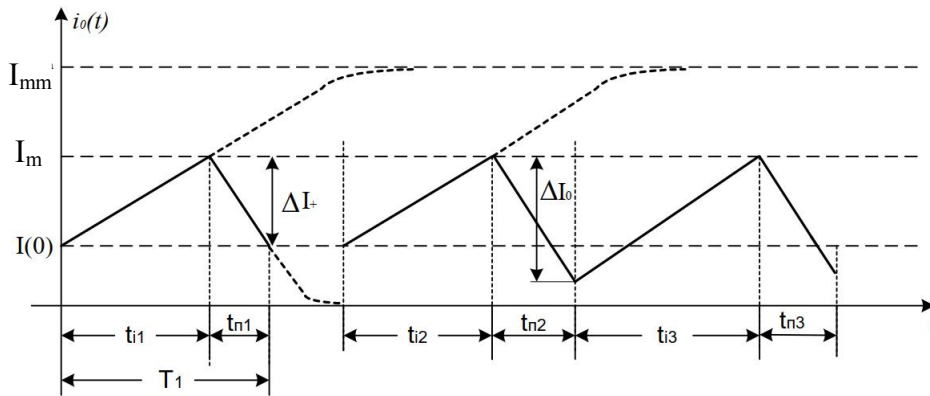


Рис. 2. Зміна струму гальмування при регулюванні з ШІМ

Fig. 2. Changing the braking current during regulation with PWM

Коефіцієнт заповнення γ_i в такому разі визначатиметься за формулою

$$\begin{aligned} \gamma_i &= \frac{(1+\delta)\tau}{(K_i-1+\delta)\tau_e + (1+\delta)\tau} \approx \\ &\approx \frac{\tau}{(K_i-1)\tau_e + \tau} = \frac{R_H + r}{K_i r + R_H}. \end{aligned} \quad (17)$$

Як впливає з (16) і (17), час паузи, відповідно й період, а також коефіцієнт заповнення, за якого пульсації за частотою збігаються з частотою комутації і не містять низькочастотної складової, залежать не тільки від опору навантаження, а й від значення струму гальмування I_0 , точніше від співвідношення між ним і максимально можливим струмом I_{mm} , який залежить від кількості обертів N ДПС.

Отже, застосування ШІМ з постійною частотою [1–4] не дає змоги забезпечити оптимальних режимів рекуперативного гальмування ні за енергією, що повертається, ні за рівнем пульсацій струму. Використання ШІМ з постійною тривалістю імпульсу дає змогу зміною часу паузи оптимізувати цей режим або за пульсаціями, або за енергією, але тільки за фіксованих значень обертів N і струму гальмування I_0 , навіть при зміні стану мережі з еквівалентним опором R_H . Тобто для режиму рекуперативного гальмування стаціонарних систем, які працюють з фіксованою швидкістю, ШІМ є доцільнішим способом комутації силового ключа.

Очевидно, що для динамічних транспортних систем, в яких можливі зміни умов руху і стану мережі, доцільнішим буде спосіб, за якого здійснюється адаптація часу комутації t_i і часу паузи t_{II} за пульсаціями або за енергією, тобто двопозиційне (релейне) регулювання. Як відомо

[5–8], такий спосіб спрощує схему керування, але ускладнює силовий фільтр нижніх частот (ФНЧ), параметри якого мають визначатися за максимально можливою тривалістю імпульсу комутації і паузи, згідно з (11) і (12) або (11) і (16).

Водночас живлення від вторинної мережі і вартість елементів потужних приводів на перший план ставлять завдання створення безпечних режимів їх роботи і зменшення габаритів ФНЧ, тому за будь-якого способу регулювання потрібні заходи з контролю напруги у вторинній мережі і компенсації «зайвої» енергії рекуперативної. Це стає можливим у разі застосування нарівні з рекуперативним і електродинамічним гальмування, а також проміжного накопичення енергії [8–11] (рис. 3).

Під час паузи заряд ємності C здійснюється майже постійним струмом, що зменшує рівень пульсацій і втрат на обмотках. За відсутності інших споживачів або при великому їх еквівалентному опорі R_H напруга в мережі зростає приблизно за лінійним законом, а не стрибком, що дає змогу з певною інерційністю її контролювати додатковим ключем VT2, який вмикає баластний опір R_6 при досягненні допустимого значення перенапруг у мережі. «Зайва» енергія двигуна витрачається не тільки на обмотках, а й на баластному опорі. За наявності інших споживачів енергія, що накопичена в ємності C , передається до них не тільки під час паузи, а й під час імпульсу, що збільшує кількість поверненої енергії порівняно з іншими способами гальмування, розглянутими раніше. Своєю чергою, накопичення і контроль енергії рекуперативної дає змогу застосувати ШІМ з фіксованою частотою, спростити ФНЧ і схему керування.

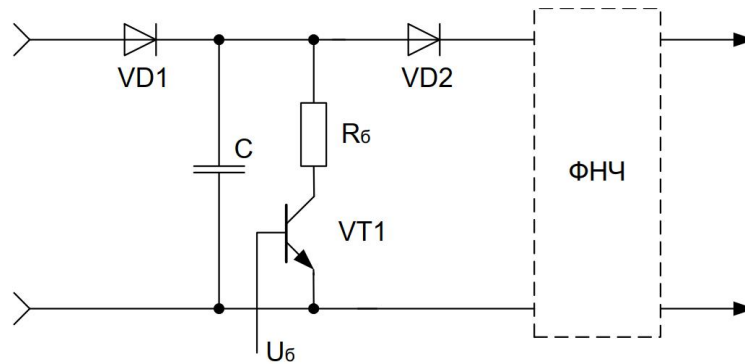


Рис. 3. Схема узгодження ДПС з мережею в режимі гальмування

Fig. 3. Scheme of coordination of DC motor with the network in braking mode

Висновки

1. Оптимізація режиму гальмування двигуна постійного струму, зокрема за використання широтно-імпульсної модуляції, є можливою в разі введення додаткового накопичувача енергії.
2. Важливим результатом дослідження є можливість додаткового споживання електричної енергії в гальмівних режимах.
3. Забезпечуються безпечні режими електропривода і мережі, як за різкої зміни стану мережі, так і електропривода, наприклад, у разі розриву струмозмінача.
4. Ефективність запропонованих заходів була експериментально підтверджена під час керування тяговим електроприводом і його гальмування.

Бібліографічний список

1. Бурлака В. В., Гулаков С. В., Поднебенна С. К. Удосконалення схемних рішень частотно-регульованого електропривода. *Міжнар. науково-техн. конф. (Маріуполь, 16-17 трав. 2019 р.): в 4 т. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. Т. 1. С. 247–248.*
2. Брускин Д. З., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины и микромашины. Москва: Высш. шк., 1990. 528 с.
3. Видмиш А. А., Трошин О. І. Теорія електропривода. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. 404 с.
4. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника: лабораторные работы на ПК. Санкт-Петербург: Корона, 2002. 304 с.
5. Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины: лабораторные работы на ПК. Санкт-Петербург: Корона, 2003. 256 с.
6. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. Санкт-Петербург: Корона, 2001. 319 с.
7. Глазенко Т. А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. Москва: Энергия, 1973. 304 с.
8. Гольц М. Е., Гузденко А. Б., Остреров В. М. Быстродействующие электроприводы постоянного тока с широтно-импульсными преобразователями. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 253 с.
9. Исследование режимов торможения в системе импульсного регулирования серийного электродвигателя / П. Д. Андриенко, А. О. Каплиенко, С. И. Шило, И. Ю. Немудрый. *Електротехніка та електроенергетика*. 2007. С. 11–14.
10. Метельський В. П. Электричні машини та мікромашини. Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. 616 с.
11. Мокін Б. І., Мокін В. Б., Мокін О. Б. Математичні методи ідентифікації динамічних систем: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2010. 260 с.
12. Пегов Д. В., Бурцев П. В., Андреев В. Е. Руководство по устройству электропоездов ЭТ2, ЭР2Т, ЭД2Т, ЭТ2М. Москва: Центр коммерческих разработок, 2003. 184 с.
13. Перльмутер В. М., Сидоренко В. А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 304 с.
14. Спосіб гальмування двигуна постійного струму та пристрій для його реалізації: пат. 47111А, МКІ H02 P3/08; публ. 17.06.02, Бюл. № 6.
15. Aspalli M., Asha R., Hunagund P. Three phase induction motor drive using IGBTs and constant V/F method. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2012. № 1. С. 463–469.
16. Behera P. K., Behera M. K., Sahoo A. K. Speed Control of Induction Motor using Scalar Control Technique. *International Journal of Computer Application*. 2014. No. 1. P. 37–39.
17. Bondar R. P., Golenkov G. M., Lytvun A. Y., Podoltsev A. D. Modelling of power characteristics of the vibrator with a linear electric drive. *Electromechanical and energy saving systems*. 2013. No. 2. P. 66–74.
18. Bondar R. P., Podoltsev A. D. Complex model with frequency dependent parameters for electrodynamic shaker characteristics. *Technical electrodynamic*. 2017. No. 1. P. 44–51. doi: 10.15407/techne2017.01.044.
19. Choi J. Y., Kan H. B. Comparison and dynamic behavior of moving-coil linear oscillatory actuator with/without mechanical spring driven by rectangular voltage source. *Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2014. No. 3. P. 394–397. doi: 10.11142/jicems.2014.3.4.394.
20. Orlovskii I. A. On the power in an electrical circuit with a valve. *Works of the Tavria State Agrotechnological University*. 2013. No. 13. P. 141–150.

Стаття надійшла 04.10.2019

ПОРІВНЯННЯ ЕНЕРГООЩАДНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ

Олександр Мірошник, д. т. н.

*Харківський національний технічний університет сільського господарства
ім. П. Василенка,
вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, e-mail: omiroshnyk@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.100>

Мірошник О. Порівняння енергоощадності систем електропостачання побутових споживачів

Електрична енергія, що постачається енергопостачальними організаціями споживачам за договорами, є товаром особливого виду, що характеризується збігом у часі процесів виробництва, транспортування та споживання, а також неможливістю його зберігання та повернення. Відповідно, як до будь-якого виду товару, до електричної енергії застосовується поняття «якість». Відхилення показників якості електричної енергії від встановлених стандартами погіршують умови експлуатації електроустановок як мережі, так і споживачів.

Аналіз наукових робіт, які висвітлювали проблеми боротьби з неякісною електричною енергією в системах електропостачання 0,38/0,22 кВ, показує, що на сьогодні існує безліч методів і технічних засобів для покращання показників якості та зниження втрат електричної енергії, але всі вони через свою високу вартість, низьку надійність та ефективність за наявності протяжних ліній, що живлять комунально-побутове навантаження, не отримали широкого використання. Тому відсутність комплексного підходу до вирішення проблеми якості електричної енергії не давала змоги розробити об'єктивні рекомендації щодо методів, способів і технічних засобів зниження втрат електричної енергії.

Тому всебічний аналіз усіх чинників, що впливають на енергоощадність та якість електричної енергії в системах електропостачання 0,38/0,22 кВ, дозволить вирішити цю проблему й рекомендувати економічно вигідні заходи щодо зниження втрат електричної енергії. У зв'язку з цим необхідно спроектувати і побудувати більш енергоефективні системи електропостачання, які б мали низьку перевагу порівняно з існуючою системою електропостачання, якій притаманні значна несиметрія струмів і напруг та значні втрати електричної енергії.

Ключові слова: система електропостачання, втрати електричної енергії, моделювання режимів мережі.

Miroshnyk O. Comparison of the energy savings of household electricity supply systems

The electricity supplied by the energy supplying organizations to the consumers under the contracts acts as a commodity of a special kind, is characterized by the coincidence in time of the processes of production, transportation and consumption, as well as the impossibility of its storage and return. Accordingly, the concept of «quality» is applied to electricity, as for any type of product. Deviation of electricity quality indicators from the set standards exacerbates the operating conditions of electrical installations of both the network and consumers.

The analysis of scientific works, devoted to the problems of combating low-quality electricity in 0,38 / 0,22 kV power systems, shows that there are many methods and techniques available today to improve quality indicators and reduce electricity losses, but all because of its high cost, low reliability and efficiency are not widespread in the long utility lines. Therefore, the lack of a comprehensive approach to solution of the problem of electricity quality did not allow developing of objective recommendations on methods and technical means to reduce electricity losses.

Therefore, a comprehensive analysis of all factors that affect the energy savings and quality of electricity in power systems 0,38 / 0,22 kV will solve this problem and recommend cost-effective measures to reduce electricity losses. In this regard, it is necessary to design and build more energy efficient power systems, which would have several advantages over the existing power system, in which there is significant asymmetry of currents and voltages and significant losses of electricity.

Key words: power supply system, electricity losses, modeling of network modes.

Постановка проблеми. Основними чинниками, які характеризують систему електропостачання, є вартість її спорудження, надійність та економічність передачі електроенергії споживачам. Зниження втрат електроенергії в електричних мережах до обґрунтованого рівня – один із важливих напрямів енергозбереження. У зв'язку

з розвитком ринкових відносин в країні значущість проблеми втрат електроенергії істотно зросла. Вартість втрат є однією зі складових тарифу на електроенергію. На сьогодні характер і питомі показники електроспоживання побутовими електроприймачами в сільській місцевості інколи значно перевищують ці показники в містах, при

цьому потужності електроприладів окремих помешкань значно відрізняються. У зв'язку зі зростаючим рівнем електрифікації виробничих процесів і побуту значно зростають вимоги до якості електричної енергії та надійності систем електропостачання.

Існуюча в нашій країні трифазна чотирипровідна система електропостачання сільських споживачів 0,38/0,22 кВ характеризується низкою недоліків: високий рівень втрат електроенергії (до 15 % від електроенергії, що надійшла в мережу), незадовільна якість електроенергії (перевищення коефіцієнтів несинусоїдальності, нульової та зворотної послідовності у 2–4 рази), високий рівень втрат напруги, який призводить до відхилень напруги у віддалених споживачів, що не відповідає вимогам ДСТУ ІЕС 61000-4-30-2010 [1; 2; 4; 5; 15]. Усе це призводить до значних збитків електропостачальних компаній, а також завдає значної шкоди споживачам електричної енергії.

Під час проектування сільських ліній електропередачі прагнуть якомога рівномірнішого розподілу споживачів по фазах. На сьогодні існує безліч пристроїв для симетрування мережі, але всі вони через свою високу вартість, низьку надійність та неефективність при протяжних лініях, що живлять однофазне комунально-побутове навантаження, не отримали широкого застосування в мережах 0,38/0,22 кВ.

Як відомо, в Україні протяжність ліній 0,38/0,22 кВ становить близько 50 % від протяжності ліній усіх класів напруги [3; 5; 6; 12; 13]. Електрифікація країни закінчилася в кінці 60-х років минулого століття, тому значна частина існуючих мереж вимагає повної реконструкції. У зв'язку з цим необхідно спроектувати й побудувати більш економічні та надійні електричні мережі, які б мали низьку перевагу порівняно з існуючою системою електропостачання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зниження втрат електричної енергії при її передачі від виробника до споживача є актуальним завданням, якому впродовж усього часу існування

системи електропостачання приділяють велику увагу. На виконання цього завдання спрямовані наукові дослідження щодо розроблення нових провідникових та ізоляційних матеріалів, конструкцій ліній електропередачі і перетворювальних пристроїв, а також пристроїв, що покращують показники режимів роботи електричних мереж.

У населених пунктах з багатоповерховими будинками лінії електропередачі мають невелику довжину від підстанцій 10-6/0,4 кВ, до яких приєднано багато споживачів, що розташовані на невеликій відстані один від одного. Найчастіше це кабельні лінії, а повітряні лінії розташовані в населених пунктах з малоповерховими будинками. У сільській місцевості здебільшого лінії повітряні, до яких приєднані однофазні споживачі на відстані 35–40 метрів, що визначається розташуванням опор.

Аналіз систем електропостачання [10; 11; 14; 15], які застосовують в інших країнах (табл. 1), показав, що країни Європи, за винятком Норвегії, широко використовують як розподільну систему електропостачання житлових і громадських будівель трифазну чотирипровідну систему напругою 400/230 В з глухозаземленою нейтраллю. Норвегія зараз використовує трифазну систему з лінійною напругою 220 В та ізольованою нейтраллю. Ця система поступово замінюється системою 400/230 В.

У США використовують систему електропостачання напругою 220/127 В, лінії якої мають невелику протяжність від опори, де встановлений однофазний трансформатор, до споживача. Кожен однофазний трансформатор обслуговує кілька будинків, за необхідності живлення трифазних споживачів на опорі встановлюють трифазний трансформатор. Аналіз цієї системи електропостачання показує, що вона є економічно найдоцільнішою.

Постановка завдання. Наше завдання – провести аналіз існуючих систем електропостачання та обґрунтувати альтернативний, економічно вигідний варіант системи електропостачання.

Таблиця 1. Стандарти напруг

Table 1. Voltage standards

Країни	Україна та країни СНД	Країни ЄС	Італія	США
Напруга (лінійна/фазна), В	380/220	400/230	420/240	220/127

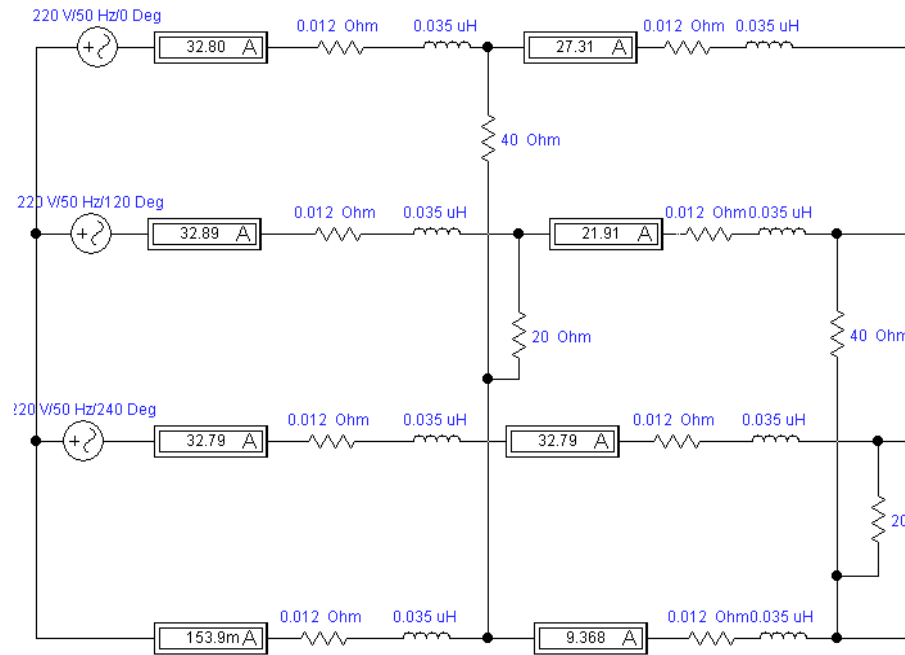


Рис. 1. Моделювання режимів мережі за допомогою комп'ютерної програми Electronics Workbench

Fig. 1. Modeling of network modes using the Electronics Workbench computer program

Таблиця 2. Розподіл втрат у проводах на ділянках

Table 2. Distribution of losses in sections wires

Провід	Ділянка 0-1	Ділянка 1-2	Ділянка 2-3	Ділянка 3-4	Ділянка 4-5	Ділянка 5-6
Фаза А, Вт	12,91	8,95	8,95	3,22	1,43	1,43
Фаза В, Вт	12,98	5,76	3,24	3,24	0,36	–
Фаза С, Вт	12,9	12,9	5,72	3,22	3,22	0,36
Нульовий провід, Вт	–	1,05	1,055	–	1,06	1,066

Виклад основного матеріалу. Розглянемо конкретний приклад мережі. Використовуючи програмний продукт Electronics Workbench [2; 7–9], проведемо моделювання роботи мережі (див. рис. 1) зі споживачами, активні опори навантаження яких мають такі значення: 20 Ом, 30 Ом, 40 Ом; початкові фази синусоїд напруги мережі дорівнюють відповідно 0, 120, 240 градусів, опори алюмінієвих проводів представлені рядом послідовно з'єднаних активних і реактивних опорів ділянок повітряної лінії ($R = 0,012$ Ом, $X = 0,011$ Ом для проводу АС-35) між точками приєднання споживачів (для повітряних ліній це відстань між опорами), споживачі включені між

одним із фазних проводів і нульовим проводом (по 3 споживачі в точці приєднання). На наведеній схемі (див. рис. 1) змодельована повнофазна ділянка лінії довжиною 210 м (шість опор). У табл. 2 наведені втрати на кожній ділянці у фазних і нульовому проводах.

Сумарні втрати в мережі становитимуть 105 Вт.

Тепер розглянемо мережу з такими ж навантаженнями, але напругою 10 кВ, в якій трансформатори 10/0,4 кВ знаходяться безпосередньо на опорах. На наведеній на рис. 2 схемі також змодельована повнофазна ділянка лінії довжиною 210 м (шість опор, до кожної приєднані однофазні споживачі). У табл. 3 наведені втрати на кожній ділянці мережі.

Сумарні втрати в мережі будуть становити 0,15013 Вт.

Порівняльний аналіз втрат показує, що в запропонованій мережі втрати в 700 разів нижчі (без урахування втрат у трансформаторах), ніж у традиційній системі електропостачання.

Дослідження [3; 7] показують, що як статичну модель можна прийняти мережу з одним трансформатором 10/0,4 кВ і двома лініями, які живлять комунально-побутове навантаження, математичне очікування довжини кожної з яких становить 700 м.

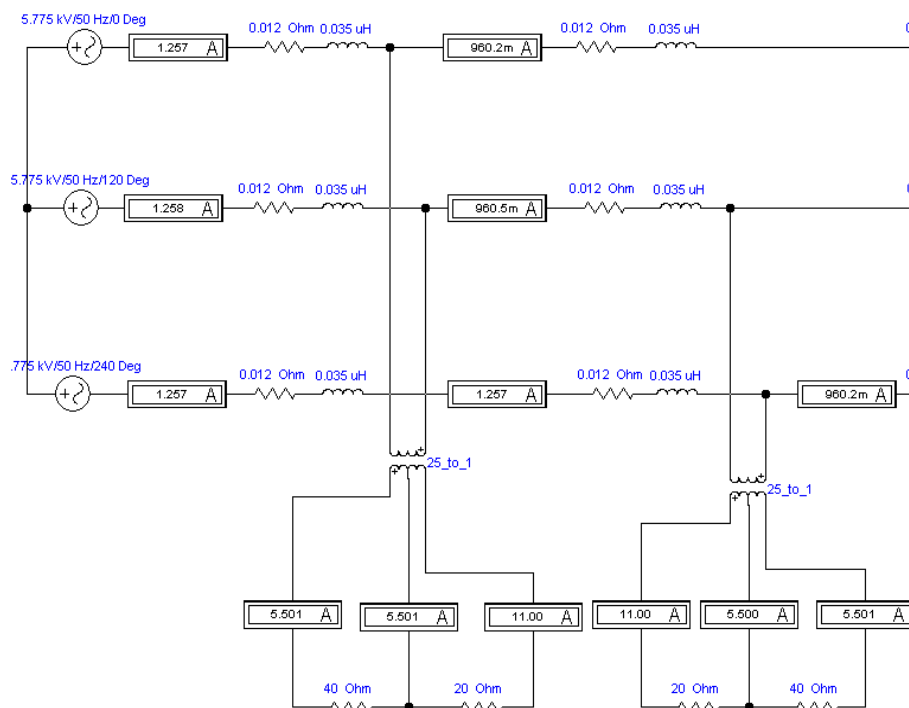


Рис. 2. Моделювання режимів мережі за допомогою комп'ютерної програми Electronics Workbench

Fig. 2. Modeling network modes using the Electronics Workbench computer program

Таблиця 3. Розподіл втрат у проводах на ділянках

Table 3. Distribution of losses in sections wires

Провід	Ділянка 0-1	Ділянка 1-2	Ділянка 2-3	Ділянка 3-4	Ділянка 4-5	Ділянка 5-6
Фаза А, Вт	0,01896	0,01106	0,01106	0,00474	0,00158	0,00158
Фаза В, Вт	0,01899	0,01106	0,00474	0,00474	0,00158	—
Фаза С, Вт	0,01896	0,01896	0,01106	0,00474	0,00474	0,00158
Нульовий провід, Вт	—	—	—	—	—	—

Таблиця 4. Укрупнені показники вартості спорудження підстанцій і ліній електропередачі

Table 4. Enlarged cost parameters of construction of substations and power line

Вартість спорудження трансформаторної підстанції 35/10 кВ 2×4 МВА, млн грн	Вартість спорудження трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ (ТС3 100 кВА) 100 кВА, грн	Вартість спорудження трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ (ОС3 16 кВА) 16 кВА, грн	Вартість спорудження 1 км лінії (АС-70) 10 кВ, грн	Вартість спорудження 1 км лінії (СИП 4 2х16) 0,38 кВ, грн
3,5	138000	15500	359000	197000

На підставі укрупнених показників вартості спорудження підстанцій і ліній електропередачі [9; 12], які наведені в табл. 4, проведемо порівняльний аналіз вартості розглянутих мереж. Базова вартість побудови лінії складається з вартостей опор, проводів, арматури, території (вартість землі) і роботи. Також необхідно врахувати витрати на благоустрій – 3 %, проектні роботи – 8 %, інші роботи – 3,5 %, інфляцію – 7,09 % та представницькі витрати – 5 %.

Розглянемо вартість спорудження системи електропостачання споживачів, які живляться від мережі 0,38/0,22 кВ (рис. 3).

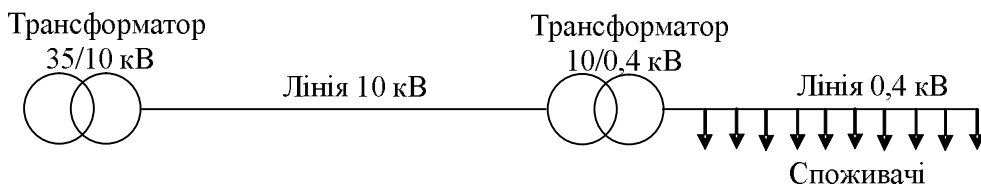


Рис. 3. Традиційна схема електропостачання

Fig. 3. Traditional power supply scheme

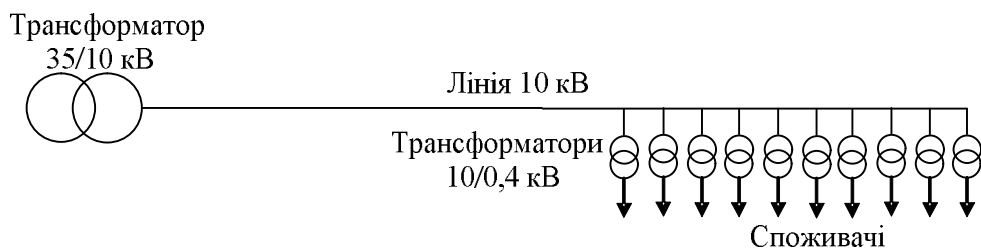


Рис. 4. Запропонована система електропостачання

Fig. 4. The proposed power supply system

Висновки. Порівняльний аналіз систем електропостачання показує, що споживачі, які живляться за запропонованою системою електропостачання (від трансформаторів невеликої потужності, встановлених на опорах), мають параметри якості електроенергії, які повністю задовольняють ДСТУ ІЕС 61000-4-30-2010. Споживачі, які живляться за традиційною системою електропостачання, мають незадовільну якість електричної енергії (перевищення коефіцієнтів несинусоїдності, прямої та зворотної послідовності в кілька разів), високий рівень втрат напруги (неприпустимі відхилення напруги у віддалених споживачів), що перевищує параметри ДСТУ ІЕС 61000-4-30-2010. Крім того, у запропонованій системі електропостачання втрати електроенергії

Визначимо вартість спорудження такої системи електропостачання. Візьмемо для розрахунку лінію 10 кВ довжиною 10 км і лінію 0,38 кВ довжиною 700 м (для 40 споживачів).

Сумарна вартість такої системи електропостачання становить 7565900 грн.

Тепер розглянемо вартість спорудження системи електропостачання споживачів, які живляться за запропонованою системою електропостачання (рис. 4).

Визначимо вартість спорудження такої системи електропостачання. Візьмемо для розрахунку лінію 10 кВ довжиною 10,7 км (для 40 споживачів). У результаті отримаємо вартість такої системи електропостачання – 7496300 грн.

значно менші, ніж у традиційній системі електропостачання. Інвестиційні вкладення в обидва проекти є рівноеконімічні. На наш погляд, під час повної реконструкції існуючих або спорудження нових ліній електропередачі необхідно переходити на запропоновану систему електропостачання, тому що існуюча система електропостачання в разі зростання навантажень здебільшого не відповідає вимогам ДСТУ ІЕС 61000-4-30-2010 і споживачі зазнають значних збитків від неякісної електричної енергії.

Бібліографічний список

1. Бурбело М. Й., Мельничук С. М., Никитенко М. В. Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 2. С. 54–56.

2. Денисюк С. П., Горенко Д. С. Обмінні процеси в трифазних автономних системах електроживлення. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. № 45. С. 9–15.
3. Дослідження енергоощадних режимів роботи розподільних мереж / О. О. Мірошник, А. С. Довгопола, Є. В. Глушач, Я. А. Романенко. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. 2018. Вип. 196. С. 24–26.
4. ДСТУ ІЕС 61000-4-30-2010. Електромагнітна сумісність (ЕМС). Ч. 4-30: Методики випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії. [Чинний від 2012-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2010.
5. Мірошник О. О. Статистичне дослідження основних параметрів сільських мереж 0,38/0,22 кВ. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК»*. № 166, ч. 4. С. 203–211.
6. Bollen, M. H. J. Definitions of Voltage Unbalance. *IEEE Power Engineering Review*. 2002. 1. P. 49-50. doi: <https://doi.org/10.1109/MPER.2002.1045567>.
7. Chen T.-N., Cherng J.-T. Optimal Phase Arrangement of Distribution Transformers Connected to a Primary Feeder for System Unbalance Improvement and Loss Reduction using a Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2000. 15. P. 994–1000. doi: <https://doi.org/10.1109/59.871724>.
8. Chitra R., Neelaveni R. A Realistic Approach for Reduction of Energy Losses in Low Voltage Distribution Network. *International Journal of Electrical Power & Energy System*. 2011. 33. P. 377–384. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.08.033>.
9. Dilek M., Broadwater R. P., Thompson J. C., Sequin R. Simultaneous Phase Balancing at Substations and Switches with Time-Varying Load Patterns. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2001. 16. P. 922–928. doi: <https://doi.org/10.1109/59.962447>.
10. Faiz J., Ebrahimpour H. Influence of Unbalanced Voltage Supply on Efficiency of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor and Economic Analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2006. 47. P. 289–302. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.04.009>.
11. Faiz J., Ebrahimpour H. Precise Derating of Three-Phase Induction Motors with Unbalanced Voltages. *Energy Conversion and Management*. 2007. 48. P. 2579–2586. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.03.023>.
12. IEEE Standard, «Definition for the measurement of Electric Power Quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced or unbalanced conditions,» (IEEE std. 1459TM – 2010), IEEE Power and Energy Society, New York, 2010.
13. Jouanne A., Banerjee B. Assessment of Voltage Unbalance. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2001. 16. P. 782–790. doi: <https://doi.org/10.1109/61.956770>.
14. Mirosnuk O. O., Tymchuk S. O. Uniform distribution of loads in the electric system 0.38/0.22 kV using genetic algorithms. *Technical Electrodynamics*. 2013. Issue 4. P. 67–73. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84885913005&partnerID=MN8TOARS> (Last accessed: 10 September 2019).
15. Verma S., Kumar P. Smart Grid, Its Power Quality and Electromagnetic Compatibility. *Islam, MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering*. 2012. No. 1. P. 55–64.

Стаття надійшла 20.09.2019

ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Дмитро Янківський¹, Віталій Бризгалов², Антон Лягушкін³

¹Українська академія друкарства,

вул. Під Голоском, 19, м. Львів, e-mail: dmitrojankivskui@gmail.com

²Компанія ТзОВ «Murmuration Technology»,

вул. Мистецька, 2, м. Кривий Ріг, e-mail: murmuration.tech@gmail.com

³Інтернет-видання «Пасажирський транспорт»

вул. Дубова, 2, м. Львів, e-mail: polygrafant@gmail.com

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.106>

Янківський Д., Бризгалов В., Лягушкін А. Джерела живлення автономного електротранспорту та ефективність їх застосування

Автономний електричний транспорт (АЕТ), який повністю або частково незалежний від контактних мереж (КМ), останніми роками набуває все більшого поширення в розвинутих країнах світу. Це пов'язано з намаганням скоротити викиди вуглекислого газу та інших токсичних речовин, що продукуються двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) автомобільного транспорту. АЕТ потребує значно менших витрат на створення й утримання інфраструктури (контактні і кабельні мережі, тягові підстанції), аніж традиційний контактний електротранспорт. У містах із розвинутими мережами традиційного електротранспорту доцільним є застосування АЕТ для обслуговування напрямів, де відсутні великі пасажиропотоки, які окупили б будівництво контактних і кабельних мереж (ККМ) і тягових підстанцій (ТП), або наявні перешкоди для будівництва інфраструктури традиційного електротранспорту.

Джерела живлення АЕТ розміщені безпосередньо на транспортному засобі. Це тягові акумуляторні батареї (ТАБ), батареї суперконденсаторів (іоністорів) та паливні елементи для прямого перетворення енергії хімічної реакції на електричний струм разом із буферною акумуляторною батареєю. Частково автономний електротранспорт (дуобуси) може використовувати для живлення тягового електродвигуна (ТЕД) енергетичні установки на базі бензинового або дизельного ДВЗ і генератора струму. Окрема група автономного транспорту – це гіробуси, тобто транспортні засоби, які використовують механічні акумулятори енергії (маховики).

У разі застосування електробусів, які живляться від ТАБ чи батарей суперконденсаторів, АЕТ потребує створення інфраструктури – зарядних станцій, які можуть розміщуватися в депо для здійснення статичної (нічної) зарядки, а також на кінцевих зупинках маршрутів – зарядні станції для швидкої (динамічної) зарядки. Тролейбуси з автономним ходом (АХ) здійснюють зарядку ТАБ від контактної мережі (КМ).

Транспорт, що приводиться від паливних елементів (ПЕ), потребує спеціальних станцій для заправки ємностей стиснутим чи зрідженим воднем.

У статті здійснено огляд і аналіз основних технічних і конструктивних рішень енергетичних установок автономного електротранспорту, що реалізовані на серійних і дослідних моделях АЕТ, який експлуатується в Україні та за її межами, а також досвіду побудови електробуса на базі мікроавтобуса «Peugeot J9 Karsan». Виконано аналіз кожного типу джерел живлення АЕТ, розглянуто перспективи його подальшого використання, а також визначено доцільні межі використання.

Ключові слова: електротранспорт, електробус, троллейбус, дуобус, гіробус, акумулятор, іоністор, паливний елемент.

Yankivskiy D., Bryzhalov V., Liahushkin A. Power supply sources for autonomous electric vehicles and the effectiveness of their application

Autonomous Electric Vehicles (AEVs), which have been wholly or partially independent of catenary grids, have recently become increasingly widespread in developed countries. This is due to the effort to reduce emissions of carbon dioxide and other toxic substances, produced by internal combustion engines (ICEs) of road transport. AEVs require much less cost to build and maintain infrastructure (contact and cable networks, traction substations) than traditional contact electric vehicles. In the cities with developed traditional electric vehicles networks, it is advisable to use AEVs to service destinations, where there are no large passenger flows that would pay for the construction of contact and cable networks (CCNs) and traction substations (TSs), or there are obstacles for the establishment of traditional electric vehicle infrastructure.

AEV power supplies are located directly on the vehicle. These are traction batteries (TBs), supercapacitor (ionistor) batteries and fuel cells for direct conversion of chemical reaction energy into electric current together with a buffer battery.

Partially autonomous electric vehicles (duo buses) can use power installations, run on gasoline or diesel engine, and an electric generator to power the traction electric motor (TEM). A separate group of autonomous vehicles are gyros, i.e. vehicles that use mechanical energy accumulators (flywheels).

In the case of electric buses powered by TBs or supercapacitor batteries, the AEVs require creating of the infrastructure, i.e. charging stations that can be housed in depots for static (night) charging, and at final stops of routes – charging stations for fast (dynamic) charging. Autonomous trolleybuses charge the TBs from the catenary grid.

Fuel cell driven vehicles require special stations to fill with compressed or liquefied hydrogen.

The article reviews and analyzes the main technical and design solutions for autonomous electric vehicle installations, which are implemented on serial and experimental models of AEVs, operated in Ukraine and abroad, as well as the experience of building Peugeot J9 Karsan minibus. The work supplies analysis of each type of AEV power sources, and considers the prospects of their further use, as well as determines the appropriate limits of exploitation.

Key words: electric vehicle, electric bus, trolleybus, duo bus, gyro, battery, ionistor, fuel cell.

Постановка проблеми. Інтенсивний розвиток міст тісно пов'язаний з виникненням електричного трамвая, який став справжньою транспортною системою і забезпечив містянам швидкі й достатньо комфортні перевезення. Пневматичні шини і досконалі ресори зумовили розвиток троллейбусного і автобусного транспорту. У мегаполісах з'явилися лінії метрополітену та приміські електрифіковані залізниці [5].

У 20-х рр. ХХ ст. з'являються масові недорогі моделі легкових авто, дешевшає паливо. Це спричинює призупинення розвитку і навіть закриття трамвайних і троллейбусних господарств – електротранспорт у 40–60-х роках замінюють автобуси, які не потребують капіталовкладень в інфраструктуру.

Водночас в останній чверті минулого століття в мегаполісах спостерігається перенасичення інфраструктури приватним автотранспортом і катастрофічне забруднення навколишнього середовища викидами транспортних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Зараз у містах автомобільний транспорт відіграє ключову роль у забрудненні атмосфери: у 2002 р. в м. Києві викиди шкідливих речовин від пересувних джерел (автотранспорт) становили 149,2 тис. т, а стаціонарних джерел – 31,6 тис. т [4]. Ці проблеми актуалізували розвиток міського електричного транспорту. Закон України «Про міський електричний транспорт» [13] передбачає пріоритетність електричного транспорту для міських територій із щільною забудовою, у рекреаційних зонах, а також у разі значного забруднення навколишнього середовища.

Електротранспорт із живленням від контактних мереж (КМ) потребує значних інвестицій в інфраструктуру та її утримання. Будівництво 1 кілометра трамвайної колії в Україні вартує близько 5 млн євро [14; 17], а 1 кілометра КМ троллейбуса близько 470 тис. євро [3]. Традиційний електротранспорт є економічно ефективним за умови значних пасажиропотоків. Це 3,5 – 6,7 тис.

пасажирів у годину «пік» для троллейбуса і 6,0 – 12,0 тис. пасажирів для трамвая [6].

Повністю та частково автономний електричний транспорт (АЕТ) (електробуси, троллейбуси з автономним ходом (АХ) та ін.) може експлуатуватися на напрямках із невеликим пасажиропотоком. Оснащення маршрутів зарядними пристроями, як правило, дешевше за влаштування КМ. Особливо актуальним є впровадження троллейбусів з АХ, адже вони заряджають тягові акумуляторні батареї (ТАБ) чи батареї суперконденсаторів від існуючої КМ.

АХ на частині маршруту може застосовуватися через перешкоди, які унеможливають будівництво КМ, наприклад, перетин троллейбусних ліній з електрифікованими залізницями не допускається ДБН В.2.3-18:2007 [7].

Отож, створення в Україні власного виробництва електроприводів для АЕТ є дуже актуальним завданням, оскільки великі міста Європи поступово відмовляються від використання громадського транспорту з ДВЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Міський електричний транспорт за способом отримання живлення і залежністю від КМ поділяють на: контактний (трамвай, троллейбус, поїзди метрополітену), безконтактний (електробуси, автобуси з живленням від паливних елементів), а також комбінований («частковий») – тобто такий, який може отримувати енергію від КМ і від бортових джерел [1]. Останні два види електротранспорту називають автономним електротранспортом (АЕТ).

Перші електромобілі з'явилися практично одночасно з винайденням трамвая і троллейбуса. Зокрема, перший електромобіль у Чехії був збудований Ф. Кржижиком ще 1895 р., але через велику масу акумуляторних батарей та їх малу ємність електромобілі не знайшли широкого застосування.

Починаючи з 40-х рр. XX ст. розпочалося виробництво дуобусів, які живилися від КМ на найбільш завантажених ділянках траси і на крутих підйомах, а там, де немає КМ, приводилися від ТАБ або ДВЗ [2]. Дуобус був побудований у Москві на автозаводі ім. Сталіна (нині – імені Ліхачова) [8]. Це був тролейбус ЗіС-154, оснащений ДВЗ, що приводив у дію генератор для живлення привідного електродвигуна на ділянках без КМ. Через значно більшу складність, ніж окремо тролейбус і окремо автобус, у серію машину не було запущено.

В Європі у 60–70-ті рр. минулого століття, було побудовано дуобуси, які мали незалежні між собою електричний привід, який живився від КМ та ДВЗ, від якого транспорт приводився на ділянках без КМ [1; 2]. Компанія «Graft und Stift» (Австрія) побудувала зічленований тривісний дуобус, одна вісь якого приводилася тяговим електродвигуном (ТЕД) постійного струму потужністю 165 кВт, а інша – через традиційну трансмісію (треступенева коробка і гідротрансформатор) від дизельного ДВЗ потужністю 177 кВт. Цей дуобус виявився дуже трудомістким в обслуговуванні і в серію не був запущений. У Німеччині в 1975 р. збудовано дуобус ОЕ305, в якому ТЕД і дизельний ДВЗ приводили ведучі колеса через одну і ту саму автоматичну коробку передач [2].

З 1976 р. Київський завод електротранспорту (КЗЕТ) виготовляв вантажні тролейбуси КТГ [16], які теж є дуобусами. Вони мають два незалежних двигуни – бензиновий ДВЗ (6-циліндровий карбюраторний ЗІЛ-157 потужністю 110 кВт при 2800 об./хв) із механічною коробкою передач та ТЕД (ДК-207ГЗ, 110 кВт), які пов'язані між собою трансмісією. Виготовлено близько 700 тролейбусів КТГ різних модифікацій, які використовувалися для доставки вантажів і транспортування несправних тролейбусів. Виробництво припинене у 1993 р. через технічну застарілість використаних конструкторських рішень.

Більш досконалі дуобуси і тролейбуси з АХ побудовані у 80-90-тих рр. XX ст. У них ДВЗ, генератор і електрична система управління ТЕД поєднані в єдину систему [1; 2]. АХ у такого транспорту може мати аварійний характер, тоді потужність дизель-генераторної установки (ДГУ) не перевищує 30 % від потужності ТЕД, а може використовуватися й для перевезення пасажирів – тоді потужність ДГУ становить не менше ніж 50 – 70 % потужності ТЕД [10].

Із підвищенням екологічних вимог до транспорту та удосконаленням ТАБ стало економічніше

застосовувати пристрої АХ від ТАБ сучасних типів [12].

Один із перших «тролейних електробусів» виготовлений у 1944 р. Він мав АХ на 15 – 20 кілометрів від потужних ТАБ, що заряджалися під час руху і стоянки від КМ [8]. Він успішно пропрацював 12 років без заміни обладнання. Проте через велику масу та об'єм акумуляторної батареї (АКБ) такі машини так і не були запущені в серійне виробництво.

У 1975 р. в Німеччині за участю компаній «MAN», «Bosch», «Varta», «Siemens» та «Voith» був побудований прототип тролейбуса з АХ моделі ОЕ302 [1; 2]. Заряд ТАБ фірми «Varta» становив 120 кВт-год, вона мала водне охолодження. Цей тролейбус був економічнішим, ніж контактні тролейбуси – за рахунок рекуперативного гальмування використовувалося 15 – 19 % енергії гальмування, а енергоспоживання на 1 кілометр пробігу становило 70 – 85 Вт-год на тонну маси тролейбуса. Запуску в серію перешкодили велика маса, висока вартість і складність машини.

Зараз одним зі світових лідерів з виготовлення тролейбусів з АХ та електробусів із живленням від АКБ є чеська компанія «Skoda» [21]. Також електрообладнання для тролейбусів з АХ виготовляють компанії «Medcom» (Польща), «Kiere Electronik» (Німеччина), «Інформбізнес» (Молдова) та ін.

Замість ТАБ у тролейбусах з АХ використовують також батареї суперконденсаторів (іоністорів). Їх використовує, зокрема, білоруський завод «Белкомунмаш» [19].

Постійне вдосконалення виробництва акумуляторів забезпечило серійне виробництво відносно недорогих ТАБ великої питомої ємності на одиницю маси та об'єму, тому на початку 2000-х років з'явилися серійні електробуси для міських і приміських перевезень. Лідером у цій галузі є китайська компанія «BYD». У Східній Європі електробуси спільно виготовляють фірми «Skoda» (електрообладнання) і «Solaris» (кузови). Електробуси-прототипи виготовлені в Україні ТзОВ «СНУП «Електронтранс» (Львів) та АТ «АК «Богдан Моторс» (Луцьк).

Паливні елементи, що безпосередньо перетворюють енергію хімічної реакції на електричну, на транспорті можуть застосовуватися тільки паралельно з буферною акумуляторною батареєю [12]. Уже розроблено «водневий» автобус «Solaris Urbino Hidrogen» [23], а компанія «Skoda» на замовлення Риги виготовила тролейбус, АХ якого забезпечується паливними елементами, але широкого розповсюдження такий транспорт поки що не має.

У 50-60-х рр. ХХ ст. був розроблений АЕТ із механічним акумулятором енергії (маховиком великого розміру) – так званий гіробус [20]. Зараз такий транспорт не використовується, хоча дослідники й далі розглядають маховики як перспективний накопичувач енергії.

Постановка завдання. Метою дослідження є огляд і аналіз конструкції та джерел живлення автономного електротранспорту (насамперед – тролейбусів з АХ), який експлуатується в Україні та сусідніх державах. На основі цього визначено доцільні межі й ефективність застосування цих джерел живлення під час конструювання серійних транспортних засобів міського електричного транспорту.

Виклад основного матеріалу. Основні методи дослідження. Автономний електротранспорт із комбінованим приводом із ДВЗ в Україні представлений серійними тролейбусами іноземного виробництва і модернізованим тролейбусом ЮМЗ Т2 [15] Південного машинобудівного заводу імені Макарова. Модернізація проведена КП «Міський тролейбус» (Кривий Ріг) за участю компанії «Ді Елком Україна» [10].

Відомості про серійні тролейбуси із АХ від ДГУ, які експлуатуються в Україні, згруповано в табл. 1.

У серійних тролейбусах, які експлуатують в Україні, де потужність ДГУ становить близько 20 – 30 % потужності ТЕД, пристрій АХ використовують як аварійний, тобто на АХ тролейбус рухається тільки без пасажирів.

Із пасажирями в Кривому Розі на АХ від ДГУ експлуатується модернізований тролейбус ЮМЗ Т2. На тролейбус, обладнаний двигуном постійного струму ЕД139АУ2 потужністю 130 кВт [15], під час модернізації встановлено ДВЗ PERKINS 1104С-44TAG2 та генератор, який на виході видає потужність 88 кВт. ДГУ має значні габарити – 1980×890×1317 мм і масу 1132 кг, тому несуча конструкція тролейбуса потребує підсилення. Об'єм паливного бака – 218 л [10].

Отож, для повноцінної роботи на маршрутах із пасажирями потужність ДГУ має становити близько 2/3 потужності ТЕД, але зі зростанням потужності ДГУ відповідно зростають і її об'єм та маса, що, відповідно, зменшує пасажиромісткість тролейбуса стандартних розмірів.

Таблиця 1. Деякі технічні характеристики тролейбусів із автономним ходом від дизель-генераторної установки, що експлуатуються в Україні

Table 1. Some technical characteristics of self-propelled trolley buses operating in Ukraine

Модель тролейбуса, місто експлуатації	Довжина кузова, м	Маса тролейбуса: споряджена і повна, кг	Потужність тягового електро-двигуна, кВт, тип	Потужність дизельного двигуна, кВт	Потужність генератора, кВт
MAN SL 172 HO, тривісний, Маріуполь	12,0	12000/20000	155 постійного струму	30	27,3
Skoda 21Tr ACI, двовісний, Чернівці	11,560	12000/18000	156 асинхронний	40	40
БКМ 321, двовісний, Одеса	11,935	11750/18000	150 асинхронний	30	
Hess BGT-N2, тривісний зічленований, Чернівці	17,913	17500/28000	155 асинхронний	50	45
ЮМЗ Т2 модернізований, двовісний, Кривий Ріг	11,640	13132/17000	130 постійного струму	88	

Усі сучасні тролейбуси проектуються низькопідлоговими, тому ДГУ розміщують у задній частині тролейбуса. Використання навіть малопотужної ДГУ забирає значну частину корисної площі салону і зменшує кількість місць для сидіння. Для прикладу, тролейбуси БКМ 321 для Одеси з ДГУ мають на 5 сидінь менше, ніж такі ж тролейбуси без ДГУ. Наявність ДГУ підвищує пожежну небезпеку тролейбуса і потребує його оснащення автоматичною системою пожежогасіння та спричинює зростання трудомісткості технічного обслуговування. Окрім того, за строком служби ДВЗ значно поступаються ТЕД. Тому тролейбуси з АХ від ДГУ уже не відповідають сучасним вимогам.

Автономний транспорт із живленням від акумуляторних батарей можна поділити на дві групи: повністю автономний – це так звані «електробуси із статичною зарядкою», ТАБ яких заряджають уночі в депо і вони впродовж усього дня працюють на маршруті без підзарядки, і частково автономний – електробуси з динамічною зарядкою на лінії та тролейбуси з АХ.

Повністю автономний електротранспорт має дві переваги: він не потребує зарядної інфраструктури на маршрутах, а для зарядки використовує дешевшу «нічну» електроенергію. Його недолік – значна маса, об'єм і вартість ТАБ, які забезпечують йому великий пробіг.

Частково автономний електротранспорт потребує зарядної інфраструктури у вигляді або «швидких» зарядних станцій на кінцевих зупинках, або традиційної КМ. Для цього електробуси оснащують струмоприймачами. Для зарядки ТАБ можна використовувати час на відпочинок і харчування водіїв, передбачений трудовим законодавством.

Будівництвом електробусів і тролейбусів з АХ займається велика кількість виробників. Це, зокрема, китайські «BYD» та «Youtong», чеські

«Skoda» та «SOR», польські «Solaris» та «Ursus Bus», білоруський «Белкомунмаш» та українські ТЗОВ «СНУП «Електронтранс», АТ «АК «Богдан Моторс» і ТЗОВ «Торговий дім «Літан».

Чеська компанія «Skoda Electric» виготовляє електробуси зі статичною (нічною) і динамічною зарядкою від зарядної станції чи від КМ тролейбуса під час руху [21]. Електробуси «Skoda PERUN HE (High Energy)» мають 12 метрів довжини, перевозять до 82 пасажирів (27 місць для сидіння). Живлення забезпечують літій-іонні ТАБ потужністю 160 кВт·год, які забезпечують пробіг заповненого електробуса 150–200 км без підзарядки. Повна зарядка ТАБ від електромережі потребує до 5 годин, при використанні спеціальної зарядної станції – близько 70 хв. 12-метрові електробуси «Skoda PERUN HP (High Power)» заряджають свої ТАБ за 5–8 хв на зарядних станціях «Skoda Ultra Ultra Charger». Пробіг від однієї зарядки – до 35 км. Такі електробуси вміщують до 85 пасажирів, у салоні – 27 сидінь.

Польська компанія «Solaris» розробила типажний ряд електробусів «Urbino electric», які мають довжину 8, 9, 12 і 18 (зічленовані) метрів [22].

Електробуси-прототипи в Україні створено у 2014–2016 рр. Їх виготовили компанії ТЗОВ «СНУП «Електронтранс» та АТ «АК «Богдан Моторс». Ці транспортні засоби експлуатуються у Львові та польському Любліні. Технічні характеристики українських електробусів подані в табл. 2.

Вартість ТАБ повністю автономного електротранспорту на сьогодні становить близько 40 % від вартості транспортного засобу. Якщо порівнювати вартість вітчизняного тролейбуса і електробуса, то електробус «Електрон» вартує приблизно вдвічі більше, ніж серійний український тролейбус.

Таблиця 2. Деякі технічні характеристики електробусів вітчизняного виробництва

Table 2. Some technical characteristics of domestic production electric buses

Модель електробуса	Компанія-виробник електрообладнання	Довжина, м	Маса, т	Потужність ТЕД, кВт	Повна пасажиромісткість, осіб	Ємність ТАБ, кВт·год, та їх тип	Величина АХ, км
Електрон E191	«Enika», Польща	12,0	13,7	2×125, асинхронні	100	225, літій-ферум-фосфат	210
Богдан A70100	«Enika», Польща	11,96	14,0	235 синхронний, від постійних магнітів	80	240 літій-іон	250

Досвід трирічної експлуатації електробуса «Електрон» Е191 на маршрутах ЛКП «Львів-електротранс» показав, що наявної ємності ТАБ не достатньо для повноцінної двозмінної роботи з пасажирями. Це пов'язано з особливостями експлуатації електробуса в міському режимі з частими зупинками для посадки-висадки пасажирів і на перехрестях. Тому виробник планує дооснастити серійні електробуси струмознімачами для зарядки від зарядних станцій чи контактної мережі.

Електробус на базі мікроавтобуса «Peugeot J9 Karsan» розроблений українською компанією «Murmuration Technology» з Кривого Рогу для перевірки можливості переобладнання серійних автобусів та мікроавтобусів у АЕТ, а також для вивчення проблем, пов'язаних із таким переобладнанням. Метою проекту також була перевірка розрахункової вартості утримання й витрат на експлуатацію. Команда розробників своїми силами виготовила весь електропривод електробуса, включно з тяговим інвертором і привідним електродвигуном.

Кузов і ходову частину мікроавтобуса «Peugeot J9 Karsan» було відновлено після багаторічної роботи на маршрутах міста Кривого Рогу і повного вичерпання ресурсу ДВЗ. Конверсія мікроавтобуса в електричний дозволяє продовжити термін його експлуатації мінімально на 5 років. Як привідний двигун у мікроелектробусі на базі «Peugeot J9 Karsan» використано синхронний ТЕД типу вентильний реактивний. Його номінальна потужність – 60 кВт, крутний момент 300 Нм у діапазоні 0 – 2500 об./хв. Особливістю ТЕД є те, що він має чотири незалежні обмотки фаз, тому може продовжити свою роботу в разі виходу з ладу однієї чи двох обмоток, чи силових блоків інвертора. ТЕД здатний витримувати перевантаження у 2 рази.

У конструкції мініелектробуса застосовані літій-іонні тягові акумулятори типу «літій-нікель-алюміній». Ємність ТАБ становить 80 кВт-год, чого вистачає на 250 км АХ при русі на міському маршруті з повним завантаженням салону (11 – 14 пасажирів) від однієї зарядки ТАБ. Маса ТАБ становить 400 кг.

Експеримент із побудовою електробуса на базі «Peugeot J9 Karsan» довів можливість розробки й побудови в Україні сучасних систем тягових електроприводів для електробусів і організації практично повного циклу їх виробництва, але показав, що переобладнання кузовів старих автобусів, особливо малого класу, в електробуси є не надто доцільним, насамперед через те, що в

серійному кузові практично неможливо правильно розташувати важкі ТАБ, а також інші елементи приводу.

Розробники вважають більш доцільною адаптацію кузовів серійних автобусів іще на етапі проектування електротранспорту, що забезпечить гнучкість у розташуванні силових агрегатів і дозволить втілити найсміливіші ідеї інженерів-розробників: 100 % низькопідлоговість, наднизький центр ваги, який забезпечує високу стійкість автомобіля, встановлення електронних систем керування і курсової стійкості тощо.

У тролейбусів з АХ від ТАБ ємність акумуляторів значно менша, аніж у електробусів зі статичною зарядкою. Компанія «Skoda Electric» для 12-метрових тролейбусів використовує ТАБ ємністю близько 55 кВт-год при потужності асинхронного ТЕД в 160 кВт [21]. Фірмою «HESS» (Швейцарія) виготовлено зічленований тролейбус «SwissTrolley lightTram 19 DC» із ТЕД потужністю 240 кВт, із ТАБ ємністю 64,3 кВт-год. Ємність ТАБ здебільшого вибирає замовник залежно місцевих умов.

В Україні виробництво тролейбусів з АХ від ТАБ налагоджене у 2017 р. на Південному машинобудівному заводі ім. Макарова у співпраці з компанією ТзОВ «Торговий дім «Літан». Тролейбуси із АХ «Дніпро» Т203 виготовляють на базі кузовів МАЗ 203 і електрообладнання компанії «Інформбізнес» (Молдова). Літій-іонна ТАБ складається зі 160 елементів і має масу 576 кг. Повний заряд ТАБ від контактної мережі триває 40 хв і відбувається під час руху й стоянки тролейбуса. Відомості про тролейбус «Дніпро» Т203 внесено в табл. 3.

Також тролейбуси з автономним ходом в Україні виготовляє АТ «АК «Богдан Моторс» на базі моделей Т701.17 і Т901.17. Виробник електрообладнання – ТзОВ «Політехносервіс» (Київ). Глибоку модернізацію тролейбуса «Skoda 21Tr» з впровадженням АХ від ТАБ проведено силами КП «Одесміськелектротранс», заявлений АХ цього тролейбуса – 40 км. На базі кузова МАЗ 203 і електрообладнання компанії «Політехносервіс» тролейбус із АХ від ТАБ побудовано «Вінницькою транспортною компанією».

При конструюванні АЕТ враховують, що довговічність ТАБ (кількість циклів заряду-розряду) залежить від глибини розряду (DOD – Depth of Discharge). Глибина розряду показує, яку кількість енергії ТАБ може віддати без зростання температури.

Таблиця 3. Деякі технічні характеристики тролейбуса з автономним ходом вітчизняного виробництва**Table 3.** Some technical characteristics of a trolleybus with autonomous course of domestic production

Модель електробуса	Довжина, м	Маса, т	Потужність ТЕД, кВт	Повна пасажиромісткість, осіб	Ємність ТАБ, кВт·год, та їх тип	Величина АХ, км
Дніпро Т203	12,2	11,8	180, асинхронний	90	до 100, літій-іонні	20 і більше

Для прикладу, під час дослідної експлуатації легкового електромобіля «Tesla Model S» встановлено, що за використання практично повного заряду ТАБ її ресурс становив 300 – 500 циклів заряду-розряду, а пробіг – лише 92 тис. км. У разі використання близько 50 % ємності ТАБ кількість циклів збільшилася до 1200 – 1500, а пробіг – до 585 тис. км. Крім того, швидкість зношення більшості типів акумуляторних батарей залежить від величини струму розрядження та заряджання. Саме тому виробник тролейбуса із АХ «Дніпро» Т203 використав ТАБ значної ємності (100 кВт·год) при заявленій величині АХ у 20 км. Тому глибина розряду не перевищує 40 – 45 %, що забезпечує довговічність ТАБ.

Як джерела живлення АЕТ можуть використовуватися не тільки згадані вже літій-іонні ТАБ, а й акумуляторні батареї інших типів [11; 12; 18]. Отож, коротко розглянемо всі типи ТАБ, які можуть використовуватися як джерела живлення АЕТ.

Свинцево-кислотні акумулятори (СКА) були використані в перших моделях автономного електротранспорту. Із серійного транспорту від СКА живляться рудникові електровози й електрокари. Сучасні СКА («гелеві») не потребують обслуговування. Найбільший ресурс (до 1000 – 1500 циклів заряду-розряду) мають так звані «поверхневі СКА», де на поверхні пластин електрохімічним способом отримується губчастий свинець – оксид свинцю PbO₂. Інші типи СКА мають ресурс 150 – 500 циклів. Номінальна напруга одного елемента СКА – близько 2,0 В, питома енергоємність (заряд) – 20–40 Вт·год на кілограм маси або 80 Вт·год/л, питома потужність – до 180 Вт/кг. Вартість СКА – близько 150 дол. США на 1 кВт·год ємності. Для забезпечення довговічності глибина розряду СКА не повинна перевищувати 50 %. Основний недолік СКА – значний час заряду (понад 8 годин) та мала кількість заряду-розряду. СКА можуть застосовуватися на тролейбусах із АХ в ролі резервного джерела живлення для аварійного пересування.

Нікель-кадмієві акумулятори (НКА) ґрунтуються на оборотній реакції між металевим кадмієм і сполукою нікелю NiOOH. Герметичні НКА мають номінальну напругу елемента 1,2 В з внутрішнім опором 0,1 – 0,2 Ом, питому енергоємність 40 – 55 Вт·год/кг і 70 – 120 Вт·год/л і питому потужність у 150 Вт/кг. Час заряду – близько 8 год. НКА витримують до 2000 циклів повного заряду/розряду. Робочий діапазон температур – від -40 °С до +70 °С. Глибина розряду не повинна перевищувати 50 – 80 %. Негативним чинником є токсичність кадмію. Використання НКА у транспорті стримує висока ціна – 400 – 800 дол. США за 1 кВт·год заряду [12; 11].

Нікель-метало-гідридні (NiMH) акумулятори (НМГА) за більшістю характеристик перевершують НКА і дешевші за них. Номінальна напруга елемента НМГА становить 1,2 – 1,25 В, внутрішній опір – 0,15 – 0,25 Ом; питома енергоємність – 30 – 80 Вт·год/кг і 250 – 300 Вт·год/л; питома потужність 250 – 1000 Вт/кг, час заряду – близько 6 год, проте розроблено алгоритми швидшого заряду, протягом 1–4 год НМГА витримують до 500 – 1000 циклів повного розряду/заряду. Робочі температури – від -20 °С до +50 °С. Рекомендована глибина розряду – у межах 50 – 85 %. Вартість у розрахунку на 1 кВт·год заряду становить близько 200 – 250 дол. США. Експлуатація ТАБ на основі НМГА потребує їх охолодження [12; 11].

НМГА використовувалися у конструкції низки легкових електромобілів і гібридних автомобілів, які було розроблено у 2000-х роках, наприклад «Prius», «Toyota Highlander», «Lexus GS 450h» та ін.

Слід зазначити, що НКА та НМГА характеризуються так званим «ефектом пам'яті», тобто оборотною втратою ємності в разі порушення рекомендованого алгоритму заряду. Для усунення цього явища необхідні спеціальні алгоритми розряду-заряду цих типів акумуляторів [11].

Літій-іонні акумулятори (ЛІА). Перші теоретичні дослідження, які довели можливість створення потужних акумуляторів на основі літію,

з'явилися у 70-х рр. XX ст. Промисловий випуск ЛПА розпочався у 1991 р. компанією «Sony». Робота ЛПА базується на русі іонів літію від від'ємно зарядженого анода (виготовляється із LiC_6 або $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) до катода з додатним зарядом (виготовляється з LiMn_2O_4 , LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiFePO_4) [9; 11].

Сучасні ЛПА мають номінальну напругу елемента 3,5 – 3,8 В; внутрішній опір 0,15 – 0,25 Ом; питому енергоємність 100 – 190 Вт·год/кг і до 250 Вт·год/л; питому потужність до 1800 Вт/кг. Тривалість заряду для більшості ЛПА – близько 2 год, а кількість циклів заряду-розряду – до 2000. Рекомендована глибина розряду – не більше ніж 80 %. ЛПА не мають «ефекту пам'яті», тому не потребують складних алгоритмів зарядки. Середня вартість ЛПА зараз становить 120 – 180 дол. США за 1 кВт·год з перспективою падіння до 90 дол. США за 1 кВт·год.

Найперспективнішими є літєві акумулятори на базі модифікованого нано-титанату літію (Li_2TiO_3), які можуть витримувати до 8000 циклів заряду/розряду, проте мають високу вартість. Завдяки відносно низькій вартості і безпеці також перспективними є акумулятори на базі LiFePO_4 , які забезпечують значні робочі струми. Нижній поріг робочих температур літєвих акумуляторів становить від -30 – -15 °С до $+50$ – $+60$ °С. Розроблені також так звані «літій-полімерні» акумулятори (Li-pol, ЛПА), які характерні тим, що як електроліт використовується полімерний матеріал із включенням желеподібного літій-провідного наповнювача. Питома потужність ЛПА на 20 % більша, ніж у звичайних ЛПА, але більшість ЛПА не здатна видавати значні струми.

Короткий огляд різних типів ТАБ для живлення АЕТ показує, що на сьогодні саме вибір ЛПА різних типів є оптимальним, оскільки завдяки високій напрузі елемента можна зменшити їх кількість у ТАБ, крім того, висока питома енергоємність забезпечує мінімальну масу та об'єм літій-іонних ТАБ порівняно з іншими типами акумуляторів. Екологічна безпека ЛПА забезпечується їх герметичністю, хоча вони залишаються пожежо-небезпечними в разі порушення рекомендованих режимів роботи.

Через те що сучасні ЛПА практично не потребують обслуговування, вони можуть встановлюватися на даху низькопідлогових транспортних засобів, але при цьому потрібно перевірити стійкість транспортного засобу на поворотах – розрахунком має бути встановлено розташування центра ваги транспортного засобу і максимальну швидкість під час проходження поворотів малого радіуса.

Для оцінки необхідної ємності E ТАБ, кВт·год, залежно від величини A_X можна скористатися такою формулою:

$$E = \frac{S \cdot e_{num} \cdot M \cdot K_d}{\eta_a \cdot \eta_{np} \cdot DOD}; \quad (1)$$

де S – величина A_X , км; e_{num} – питома електроспоживання електробуса чи тролейбуса, кВт·год/(км·год). За експериментальними даними $e_{num} = 0,07 - 0,085$ кВт·год/(км·год) [1; 8]; M – максимальна маса транспортного засобу з пасажирами; K_d – коефіцієнт, який враховує витрату енергії на опалення чи кондиціонування салону й кабіни тощо; η_a , η_{np} – коефіцієнти корисної дії акумуляторів і приводу; DOD – допустима глибина розряду для обраного типу ТАБ.

Масу M_a та об'єм V_a ТАБ наближено можна оцінити так:

$$M_a = \frac{E}{e_{mnum}}; \quad V_a = \frac{E}{e_{vnum}}, \quad (2)$$

де e_{mnum} , e_{vnum} – питомі енергоємності акумуляторів з розрахунку на один кілограм маси чи літр об'єму.

Конструювання і дослідна експлуатація електробуса на базі «Peugeot J9 Karsan» показала, що ТАБ для електробусів потрібно вибирати насамперед не за новизною і великою густиною енергії на одиницю маси, а за терміном служби, безпекою, стійкістю до перевантажень та кліматичних умов експлуатації. Ці умови найбільш задовольняють літій-залізо-фосфатні ТАБ, які вже давно наявні на ринку і мають відносно невисоку ціну.

Автономний транспорт із живленням від батарей суперконденсаторів (іоністорів). Основним недоліком ТАБ, які використовуються для живлення АЕТ, є їх порівняно невисока довговічність. Здебільшого довговічність ТАБ значно менша, ніж у кузова і електропривода тролейбуса чи електробуса. Тому конструктори шукають альтернативні джерела енергії для АЕТ.

Одним із таких джерел є суперконденсатори (іоністори), в яких енергія накопичується у вигляді статичного заряду. Іоністор – двошаровий електрохімічний конденсатор, займає проміжне місце між конденсаторами і хімічними джерелами струму, обкладками якого є подвійний електричний шар на межі розподілу електрода та електроліту. Іоністори повністю безпечні у використанні та не потребують догляду, їх зарядка відбувається дуже швидко.

Сучасні іоністори, які використовуються як накопичувачі електричної енергії в АЕТ, значно

відстають від усіх типів ТАБ за своїми показниками енергоємності на одиницю маси та об'єму – переважно 5 – 30 Вт·год/кг і 1 – 1,5 Вт·год/л, проте значно перевищують їх за питомою потужністю – 4 – 5 кВт/кг. Водночас сучасні іоністори можуть без втрати ємності витримувати понад 500 тис. циклів заряду-розряду, тобто ресурсу іоністорів вистачить на 50 років роботи електробуса, що перевищує ресурс його ТЕД та кузова.

Типажний ряд електробусів із живленням від батарей іоністорів розроблений компанією «Белкомунмаш» і включає моделі довжиною 9 м (Е490), 12 м (Е420 та Е321) і 18 м (Е433). У Мінську електробуси Е433 «Vitovt Max Electro» з травня 2017 р. працюють із пасажирами на маршрутах. Зарядка батарей іоністорів відбувається за допомогою струмознімачів на даху електробуса на трьох зарядних станціях, які розташовані на кінцевих точках маршруту. Зарядка триває 5 – 8 хв, максимальна величина струму заряджання – 500 А. Заявлена виробником величина АХ – до 40 км (для моделі Е321).

Зауважимо, що, на відміну від ТАБ, у яких напруга падає лише незначно залежно від глибини розряду, у іоністорів при постійному струмі розрядки вона падає практично за лінійним законом, що потребує застосування відповідного алгоритму в системі керування тяговим електроприводом.

Автономний транспорт із живленням від паливних елементів ТАБ та іоністори, які зараз використовуються АЕТ як джерела живлення, в основному не можуть конкурувати з ДВЗ за енергоємністю. Пробіг електробусів із ТАБ обмежується 300 – 350 км, електробусів з іоністорами – до 40 км. Паливні елементи – це той вид джерела енергії для АЕТ, який може забезпечити йому пробіг від однієї заправки воднем на рівні з ДВЗ [12]. У вигляді палива у них використовують водень або метанол.

На сьогодні найперспективнішими типами паливних елементів (ПЕ) вважають: паливні елементи з лужним електролітом, як правило, розчином КОН (ПЕЛЕ); паливні елементи з протонно-обмінними мембранами (ПЕПОМ) з електролітом у вигляді полімеру; паливні елементи з твердооксидними електролітами (ПЕТОЕ) та прямі метанолові паливні елементи (ПМПЕ), де електроліт перебуває у вигляді полімеру чи рідкої кислоти.

Залежно від типу ПЕ, їх ККД є в межах від 30 – 40 % до 45 – 50 %, що значно перевищує ККД теплової генерації на електростанціях.

Для використання на транспорті найбільш придатні ПЕЛЕ, ПЕПОМ та ПМПЕ, адже діапазон

їх робочих температур становить 50 – 200 °С. Найбільш енергоефективними є ПЕПОМ, які на 1 м² площі реакції дають потужність 3,5 – 6 кВт. Енергоефективність ПМПЕ становить 1,5 – 3,2 кВт/м², а ПЕЛЕ – 2 – 3 кВт/м². Вартість ПЕ трьох типів, окрім ПЕТОЕ, становить близько 200 дол. США в розрахунку на 1 кВт, а у ПЕТОЕ – близько 1500 дол. на 1 кВт. Щодо терміну служби, то у ПЕЛЕ та ПМПЕ він становить до 10 тис. год, у двох інших типів – до 40 тис. год.

Недоліком усіх типів ПЕ є те, що вони при сталій швидкості хімічної реакції продукують сталий за величиною струм. Тому для гасіння пікових навантажень при розгоні транспортного засобу необхідна додаткова буферна батарея – це може бути акумулятор чи батарея іоністорів.

Починаючи з кінця 2000-х рр. розробляються конструкції електричних автобусів із водневими ПЕ. Як правило, ємності для зберігання водню в стиснутому або зрідженому стані розміщують на даху таких транспортних засобів. Проблемою розвитку такого транспорту є організація промислового видобутку водню внаслідок електролізу води, що є дуже енергоємним процесом. У разі, якщо електроенергія генерується тепловими електростанціями, екологічна вигода від транспорту на водневих ПЕ вельми сумнівна, отож запровадження АЕТ із живленням від ПЕ потребує розвитку альтернативної або ядерної генерації. Крім того, ПЕ потребують удосконалення і здешевлення технології виготовлення, адже для ефективної роботи АЕТ потрібно, щоб вартість ПЕ знизилася до 100 – 150 дол. США в розрахунку на 1 кВт.

Механічні акумулятори енергії для АЕТ.

Як механічні акумулятори енергії використовувалися маховики з великим моментом інерції мас за рахунок масивного ободу. Такі маховики розміщували під підлогою транспортного засобу у вакуумній камері для зменшення тертя об повітря. Пасажирські транспортні засоби з приводом від маховика були побудовані малими серіями компаніями «Ерлікон» і «General Electric» у 40–60-х рр. ХХ ст. [20]. На зупинках контактні штанги гіробуса з'єднувалися з мережею змінного трифазного струму. Асинхронний електродвигун розкручував маховик до високої частоти обертання. Під час руху від маховика приводився генератор, який через електричну систему управління приводив ТЕД.

Запасу енергії маховика вистачало на пробіг до 9 км, проте дорожні затори завадили розвитку такого виду транспорту – під час зупинки внас-

лідок тертя маховика об повітря постійно зменшувався запас енергії.

Дослідники продовжують розглядати маховики як перспективні накопичувачі енергії: потужність маховикових накопичувачів сягає 5 – 10 кВт/кг, що значно перевершує ТАБ та батареї іоністорів. Питома енергоємність маховикових накопичувачів залежить від форми та матеріалу маховика. Для композитних матеріалів вона може сягати 15 – 50 Вт·год. Оптимальним способом збільшення енергоємності вважається підвищення частоти обертання маховика. Поки що в цьому напрямі ведуться лише теоретичні дослідження.

Висновки. Це дослідження показує, що найефективнішим джерелом живлення для АЕТ на сьогодні є ЛІА, які мають найвищу напругу елемента (3,6 В і вище) і високі показники питомої енергоємності та потужності в розрахунку на одиницю маси та об'єму. Саме тому більшість виробників використовує ЛІА в конструкції електробусів та тролейбусів із АХ. Активні дослідження та вдосконалення технології виготовлення ЛІА забезпечують покращання їх енергетичних характеристик та зниження вартості.

ЛІА можна ефективно використовувати як для міських, так і міжміських (на відстані до 200 – 250 км) пасажирських транспортних засобів. На сьогодні провідні виробники виготовляють обладнання (зарядні станції) для швидкої (динамічної) та нічної (статичної) зарядки. Основний недолік ЛІА та інших типів ТАБ – це відносно невеликий термін служби, який менший за термін служби кузовів та електроприводів. Але, незважаючи на це, літєві ТАБ на разі є найбільш розповсюдженим і перспективним джерелом живлення для АЕТ, включно з тролейбусами з АХ.

Перспективним джерелом енергії для міських електробусів і тролейбусів з АХ є батареї суперконденсаторів (іоністорів). Хоча за енергетичними показниками вони досі програють літій-іонним ТАБ, їх основна перевага – довговічність. Серійний зразок електробуса БКМ Е321 зі швидкою зарядкою батареї іоністорів має заявлену величину АХ до 40 км, чого достатньо для роботи на міських маршрутах. Проте батареї іоністорів не можуть бути використані в конструкції міжміського транспорту.

Водневі ПЕ забезпечують транспортним засобам пробіг від однієї заправки на рівні з ДВЗ, тому вони можуть використовуватися для транспорту, який працює на міських та міжміських маршрутах. ПЕ є екологічно чистими, а їх ККД є

на 45 – 50 % вищий, ніж у ДВЗ. Використання ПЕ як джерел живлення для АЕТ стримується їх високою вартістю, а також проблемами з виробництвом водню в промислових масштабах способом електролізу води. Застосування ПЕ на транспорті потребує активного впровадження ядерної й альтернативної енергетики замість теплової генерації.

АЕТ із комбінованими силовими установками, що містять ДВЗ, на сьогодні вже морально застарів, оскільки не є екологічно чистим видом транспорту. В Україні такий транспорт використовується у вигляді тролейбусів із АХ, більшість із яких має лише аварійний АХ від ДГУ. Зараз виробники розглядають комбіновані силові установки, які поєднують ТЕД та ДВЗ в основному для так званих «гібридних автобусів», які є значно економніші, ніж традиційні.

Механічні акумулятори енергії – маховики – зараз не використовують у конструкції АЕТ, проте на рівні теоретичних досліджень вони розглядаються як перспективне джерело енергії для міського АЕТ.

Бібліографічний список

1. Богдан Н. В., Атаманов Ю. Е., Сафонов А. И. Троллейбус. Теория, конструирование, расчет. Минск: Ураджай, 1999. 346 с.
2. Богдан Н. В., Николаев В. П., Сафонов А. И. Перспективные направления развития городского нерельсового транспорта. Минск: Ураджай, 1999. 64 с.
3. Будівництво тролейбусної лінії від розворотного кола «Героїв Праці» до розворотного кола «Північна Салтівка». URL: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2019-04-18-001590-b> (дата звернення: 28.09.2019).
4. Викиди забруднюючих речовин та діоксиду вуглецю у атмосферне повітря (1990–2018 роки). Головне управління статистики у м. Києві: офіц. вебсайт. URL: <http://kiev.ukrstat.gov.ua/p.php3?c=1730&lang=1> (дата звернення: 28.09.2019).
5. Вучик В. Р. Транспорт в городах, удобных для жизни. Москва: Территория будущего, 2011. 576 с.
6. ДБН Б.2.2-12:2018. Планування і забудова територій. [Чинний від 2018-09-01]. Київ: ДП «Укразбудінформ», 2018. 179 с. (Державні будівельні норми України).
7. ДБН В.2.3-18:2007. Споруди транспорту. Трамвайні і тролейбусні лінії. Загальні вимоги до проектування. [Чинний від 2008-01-01]. Київ: ДП «Укразбудінформ», 2008. 58 с. (Державні будівельні норми України).
8. Ефремов И. С. Троллейбусы: теория, конструкция и расчет: учеб. для вузов по спец. «Городской электрический транспорт». Москва: Высш. шк., 1969. 488 с.
9. Кедринский И. А., Яковлев В. Г. Li-ионные аккумуляторы. Красноярск: Платина, 2013. 268 с.

10. Модернизация троллейбусов с заменой системы управления тяговым двигателем и установкой дизель-генератора: проспект-каталог. Киев: Ди Елком Україна, 2017. 20 с.
11. Нижниковский Е. А. Современные электрохимические источники тока: монография. Москва: Радиотехника, 2015. 296 с.
12. Овсянников Е. М., Долбилин Е. В., Кошеляев Е. М. Электрооборудование автотранспортных средств с тяговыми электроприводами. Москва: Палеотип, 2010. 364 с.
13. Про міський електричний транспорт: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1914-15> (дата звернення: 28.09.2019).
14. Трамваї № 6 та № 2 відсьогодні їздять за новими маршрутами – у Вінниці відкрито ново-збудовану колію. *Вінницька міська рада*: офіц. вебсайт. URL: <https://www.vmr.gov.ua/Lists/CityNews/ShowNews.aspx?ID=1709> (дата звернення: 28.09.2019).
15. Троллейбус городской ЮМЗ Т2.09. Техническое описание. Днепропетровск: ЮМЗ, 2008. 124 с.
16. Троллейбус грузовой КТГ-1: руководство по эксплуатации, обслуживанию и ремонту. Киев: Киев. завод электротранспорта им. Ф. Дзержинского, 1978.
17. У Львові відкрили для руху новозбудовану лінію трамвая на Сихів. *Львівська міська рада*: офіц. вебсайт. URL: <https://city-adm.lviv.ua/news/city/transport/235674-u-lvovi-vidkryly-dlia-rukhu-novozbudovanu-liniiu-tramvaia-na-sykhiv> (дата звернення: 28.09.2019).
18. Хрусталеv Д. А. Аккумуляторы. Москва: Изумруд, 2003. 224 с.
19. Электробус модели E433 «VITOVТ MAX ELECTRO». URL: <https://bkm.by/catalog/elektrobus-modeli-e433-vitovt-max-electro/> (дата обращения: 28.09.2019).
20. Habarda D. Nove dopravne systemy v mestkey hromadnej dopravne. Bratislava: Vydavatelstvo technickej a ekonomickej literatury «ALFA», 1986. 216 с.
21. SKODA. Trolley / Battery BUSES: проспект-каталог. Пльзень: SKODA ELECTRIC a.s., 2018. 22 с.
22. Solaris: Napedy alternatywne. Katalog produktowy 2019. Ovinska: Solaris Bus & Coach S.A., 2019. 8 с.
23. Światowa premiera > Hydrogen. URL: <https://www.solarisbus.com/pl/pojazdy/napedy-zeroemisyjne/hydrogen> (Last accessed: 29 September 2019).

Стаття надійшла 03.10.2019

Розділ 5
НАДІЙНІСТЬ І ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС МАШИН

УДК 621.793.71

**ТРИБОКОРОЗІЙНА ТРИВКІСТЬ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ
З ЕЛЕКТРОДУГОВИМИ ПОКРИТТЯМИ
З ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ 60X15P2ГС ТА 75X19P3C2**

Василь Винар, к. т. н.,

Мирон Головчук, аспірант,

Христина Василів, к. т. н.,

Володимир Гвоздецький, к. т. н.,

Надія Рацька, к. т. н.,

Євген Рудковський, провідний інженер

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,

вул. Наукова, 5, м. Львів, Україна,

e-mail: chrystyna.vasyliv@gmail.com

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.117>

Винар В., Головчук М., Василів Х., Гвоздецький В., Рацька Н., Рудковський Є. Трибокорозійна тривкість вуглецевих сталей з електродуговими покриттями з порошкових дротів 60X15P2ГС ТА 75X19P3C2

Стаття присвячена дослідженню електродугових покриттів з порошкових дротів 60X15P5ГС і 75X1933C2. Електродугові покриття мають гетерогенну структуру, що складається з мартенситної матриці, зміцненої дрібнодисперсними включеннями боридів FeCrB та FeCr₂B. Твердість покриття із ПД 60X15P2ГС становить 560 HV, із ПД 75X19P3C2 – 545 HV. Досліджено корозійні і трибокорозійні характеристики електродугових покриттів з порошкових дротів (ПД) 60X15P5ГС і 75X1933C2 у розчинах 3 % NaCl; 3 % NaCl + 0,025 % (NH₄OH) і 3 % + H₂S (нас.). У всіх середовищах на анодних поляризаційних кривих електродугових покриттів (ЕДП) відсутні ділянки пасивації, а значення густини струмів корозії є в межах одного порядку 0,02 ... 0,05 мА/см². Зі зростанням рН розчинів від 4 до електродні потенціали електродугових окриттів зміщуються в область анодних значень, а струми корозії знижуються.

У сірководневому середовищі на поверхні покриттів формуються сульфідні сполуки, які при терті виконують роль твердої змазки, зменшуючи адгезійну складову контактної взаємодії, що сприяє зниженню коефіцієнтів тертя і зносу матеріалу. В аміачному середовищі в зоні контактування формуються азотовмісні плівки, що сприяє підвищенню коефіцієнта тертя. У вільноаерованому 3 % NaCl трибокорозійна тривкість покриттів найнижча. Депасивуючі іони хлору в середовищі пришвидшують корозію покриттів, а сукупна дія корозійного й механічного чинників при терті призводить до зниження зносотривкості.

Сульфід- і азотовмісні вторинні структури, утворені на поверхні газотермічного покриття в корозійних середовищах, можуть суттєво знизити негативний вплив як корозійного, так і трибологічного чинників. Показано, що покриття, отримане електродуговим напиленням з ПД 75X1933C2, володіє вищою корозійною і трибокорозійною тривкістю. Стійкість до корозії забезпечує, зокрема, вищий вміст хрому, а однією з причин вищої зносотривкості є присутність карбідних і боридних фаз, що забезпечують підвищену твердість покриття.

Ключові слова: електродугові покриття, корозія, трибокорозія, хлориди, сірководень, аміак.

Vynar V., Holovchuk M., Vasyliv C., Hvozdetzkyi V., Ratska N., Rudkovskiy Y. Tribo-corrosion resistance of carbon steels with arc-sprayed coatings using powder electrodes 60X15P2ГС AND 75X19P3C2

The article is devoted to the study of electro arc coatings, deposited on steel from powder wire electrodes 60X15P2ГС and 75X19P3C2. The coatings have a heterogeneous structure, which consists of a martensitic matrix, strengthened by finely dispersed inclusions of FeCrB and FeCr₂B borides. Hardness of the coatings with PW 60X15P2ГС constitutes 560 HV, whereas PW 75X19P3C2 – 545 HV. The corrosion and tribocorrosion characteristics of coatings were studied in the following solutions: 3 % NaCl; 3 % NaCl + 0,025 % (NH₄OH) and 3 % + H₂S(sat.). In the solutions, the corrosion currents of coatings decrease, when pH changes from 4 to 9. It is explained by the stability of the coating components in neutral and alkaline environments. In the hydrogen sulfide medium, sulfur-contained films are formed on the surface, which act as a solid lubricant during friction, and reduce the adhesive component of the contact interaction. It supports reducing of the friction coefficients and material wear. In the ammonia environment, hard nitrogen-containing films are formed in the

contact area. It increases the coefficient of friction. In 3 % NaCl, the corrosion resistance of coatings is the lowest one. In the environment, chlorine ions accelerate the corrosion of coatings, and the combined effect of corrosion and mechanical factors during friction leads to a decrease in wear resistance.

Sulfide- and nitrogen-containing secondary structures are formed on the surface of the gas-thermal coating in corrosive environments. These films can significantly reduce the negative impact of both corrosion and tribological factors. It is shown that the coating, which is obtained by electric arc spraying from PW 75X19P3C2, has better corrosion and tribocorrosion resistance. Its corrosion resistance, in particular, is provided by a high content of chromium, which reaches 19 %. The presence of carbide and boride phases in the electro arc coatings provides increased hardness and wear resistance of coating.

Key words: electro arc coatings, corrosion, tribocorrosion, chlorides, hydrogen sulfide, ammonia.

Постановка проблеми. Електродугове наплення з порошкових дротів – один із найдешевших та найпоширеніших методів нанесення функціональних покриттів, які широко застосовують для відновлення поверхонь тертя деталей та обладнання [1; 2; 4; 5; 7; 8; 12–17; 20]. Такі покриття володіють високою зносотривкістю на повітрі, але питання їх корозії і трибокорозії в агресивних середовищах на сьогодні вивчені недостатньо [9; 11; 18; 19]. Вивчення трибологічної поведінки матеріалів за впливу корозійного середовища важливе, оскільки тертя змінює чутливість матеріалу до корозії, а корозія змінює умови тертя, так що їх сукупний вплив може бути непередбачений.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання порошкових дротів (ПД) для формування покриттів дозволяє регулювати їх хімічний склад та розширити спектр експлуатаційних, функціональних та корозійних властивостей [1; 2; 4; 5; 8; 14; 17]. Такий тип матеріалів займає проміжне положення між монолітними дротами та порошками [12].

Електроди з порошкових дротів розплавляються в електричній дузі та диспергуються струменем стисненого повітря. Покриття формується послідовним укладанням розплавлених чи близьких до стану розплавлення краплин електродного дроту, які з високою швидкістю (20...180 м/с) летять до поверхні підкладки і нашаровуються на ній, формуючи гетерогенну ламелярну структуру [9; 13; 15; 18–20].

Гетерогенна структура газотермічних покриттів, у якій м'яка матриця зміцнена дрібнодисперсними включеннями твердих боридних чи карбідних фаз, забезпечує високий опір зношуванню [4; 19]. Проте, в корозійно активних середовищах гетерогенність структури покриттів і наявність пор між ламелями сприяє виникненню гальванопар і розвитку корозійних процесів. Плівки, які утворюються на поверхні покриттів у

електролітах (оксиди, нітриди, сульфідні тощо), можуть суттєво впливати як на корозійну, так і на трибокорозійну поведінку покриттів [1; 3; 5; 6; 10; 17].

Постановка завдання. Наше завдання – дослідити корозійні та трибокорозійні характеристики газотермічних покриттів, нанесених на сталь 20 методом електродугового розплення електродних порошкових дротів 60X15P2ГС та 75X19P3C2, у середовищах, що містять аміак, сірководень та хлориди.

Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень. Покриття отримували за допомогою розплення електродних порошкових дротів 60X15P2ГС та 75X19P3C2 з використанням електродугового металізатора ЕМ-17 з модифікованою системою розпилювання, за якої електрична дуга горить у каналі розпилювальної головки, що дозволяє одержувати дрібнодисперсні покриття. Металізатор живили постійним струмом з використанням випрямляча для зварювання (типу ВДУ-505).

Режим наплавлення: сила струму 150 А, робоча напруга 32 В, віддаль від сопла до поверхні напилювання – 150 мм, тиск стисненого повітря 0,65 МПа.

Трибологічні дослідження виконували на установці тертя зі зворотно-поступальним рухом індентора за схемою кулька–площина. Контртіло – керамічна кулька (Al_2O_3) діаметром 9 мм. Прикладене нормальне навантаження 10 N, довжина доріжки тертя 16 мм, швидкість переміщення індентора 0,003 м/с. Зразки для досліджень полірували до шорсткості $R_z = 2,5$ мкм.

Мікроструктуру поверхонь вивчали на сканувальному електронному мікроскопі EVO 40XVP зі системою мікрорентгеноспектрального аналізу з використанням енергодисперсійного спектрометра INCA ENERGY 350.

Електродні потенціали досліджуваних зразків, які були робочими електродами, у корозійних середовищах вимірювали відносно насиченого хлоридсрібного електрода порівняння. Допоміжний електрод платиновий. Середовища для корозійних та трибокорозійних випробувань: вільно-аерований 3 % розчин NaCl; pH 7; 3 % розчин NaCl + 0,025 % (NH₄OH); pH 9-10; 3 % розчин NaCl + H₂S(нас.), pH 4.

Експериментальні результати та їх аналіз. Електродугові покриття мають гетерогенну структуру, що складається з мартенситної матриці, зміцненої дрібнодисперсними включеннями боридів FeCrB та FeCr₂B. Твердість покриття із ПД 60X15P2ГC становить 560 HV, із ПД 75X19P3C2 – 545 HV, когезивна міцність покриттів висока і досягає 140...150 МПа (табл. 1) [11]. У процесі напилення у структурі покриттів формуються напруження розтягу першого роду, оскільки при кристалізації та охолодженні краплин (ламелей) на поверхні підкладки покриття зменшується в розмірах. У покритті з ПД75X19P3C2 вони майже вчетверо вищі, ніж із ПД 60X15P2ГC [11]. Такі напруження можуть ініціювати виникнення тріщин при терті.

Досліджували електрохімічні характеристики електродугових покриттів, нанесених з по-

рошкових дротів 60X15P2ГC та 75X19P3C2, у середовищах, що містять аміак, сірководень та хлориди (рис. 1).

Аналіз поляризаційних кривих виявив, що в різних середовищах їх параметри відрізняються несуттєво, на анодних кривих відсутні ділянки пасивації, а значення густини струмів корозії є в межах одного порядку (0,02...0,05 мА/см²). Зафіксовано, що зі зростанням pH розчинів від 4 до 9 електродні потенціали покриттів зміщуються в анодну ділянку, а струми корозії знижуються, що пояснюється більшою стійкістю компонентів покриттів у нейтральних і лужних середовищах (табл. 2). У покриття з ПД 75X19P3C2 значення густини струмів корозії дещо нижчі, а потенціали корозії додатніші, що пов'язано з його хімічним складом, зокрема вищою концентрацією хрому (див. табл. 2). На електрохімічні характеристики електродугових покриттів також впливає відкрита поруватість напилених шарів та їх хімічна гетерогенність, зумовлені особливостями процесу електродугового напилення з ПД. При цьому можливий розвиток локалізованих корозійних процесів, які спричинюватимуть руйнування сталі. Цим пояснюються відсутність ділянок пасивації на анодних кривих і доволі високі значення струмів корозії.

Таблиця 1. Механічні характеристики покриттів [11]

Table 1. Mechanical properties of coatings [11]

№ покриття	Маркування дроту	Напруження 1-го роду в покритті, МПа	Когезивна міцність, МПа	Мікротвердість, HV
1	60X15P2ГC	23,6	140	560
2	75X19P3C2	66,8	150	545

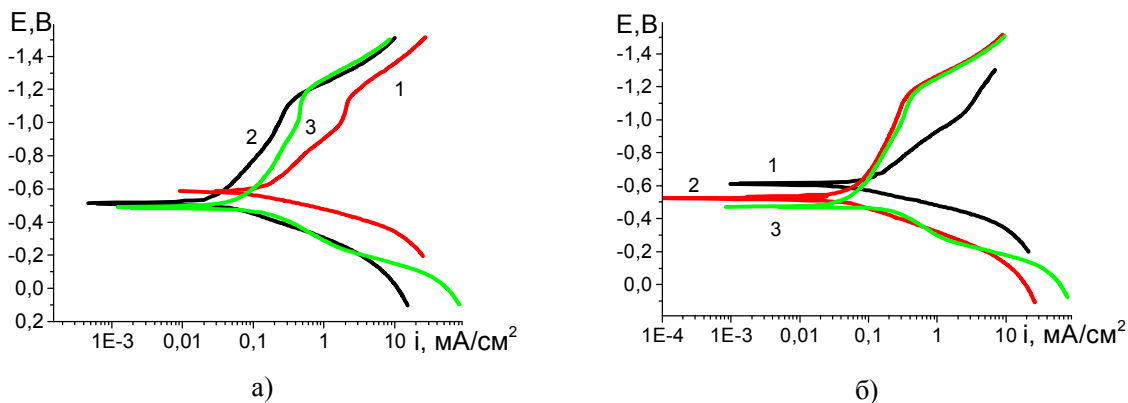


Рис. 1. Поляризаційні криві електродугових покриттів з ПД 75X19P3C2 (а) і ПД 60X15P2ГC (б) у розчинах: 1 – 3 % NaCl + H₂S(нас.); 2 – 3 % NaCl; 3 – 3 % NaCl+0,025 % NH₄OH

Fig. 1. Polarization curves of coatings, sputtered from ПД 75X19P3C2 (a) and ПД 60X15P2ГC (б) in corrosive-active environments: 1 – 3 % NaCl + H₂S (sat.); 2 – 3 % NaCl; 3 – 3 % NaCl+0,025 % NH₄OH

Таблиця 2. Електродні потенціали та густина струмів корозії покриттів у різних середовищах**Table 2.** Electrode potentials and corrosion currents density of coatings in different environments

Покриття	60X15P2ГС		75X19P3C2	
	– E, мВ	$i_{\text{кор}}$, мА/см ²	– E, мВ	$i_{\text{кор}}$, мА/см ²
3 % NaCl + H ₂ S (нас.) (рН 4)	608	$5,3 \cdot 10^{-2}$	581	$5,2 \cdot 10^{-2}$
3 % NaCl (рН 7)	540	$3,4 \cdot 10^{-2}$	522	$2,4 \cdot 10^{-2}$
3 % NaCl + 0,025 % NH ₄ ОН (рН 9)	480	$2,4 \cdot 10^{-2}$	494	$2,2 \cdot 10^{-2}$

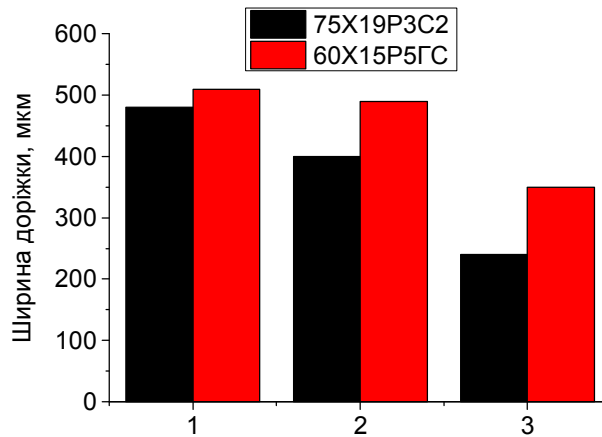


Рис. 2. Ширина доріжки тертя сталей з ЕДП у корозійно активних середовищах:

1 – 3 % NaCl; 2 – 3 % NaCl + 0,025 % NH₄ОН; 3 – 3 % NaCl + H₂S(нас.)

Fig. 2. Friction track width of steels with arc-sprayed coatings in corrosive-active environments:

1 – 3 % NaCl; 2 – 3 % NaCl + 0,025 % NH₄ОН; 3 – 3 % NaCl + H₂S(sat.)

Досліджували трибокорозійну поведінку електродугових покриттів у 3 % NaCl; 3 % NaCl + H₂S(нас.) і 3 % NaCl + 0,025 % NH₄ОН.

Знос сталей з ЕДП у корозійно активних середовищах визначали за шириною доріжки тертя. Виявлено, що знос обох досліджуваних покриттів найнижчий у 3 % розчині NaCl, насиченому сірководнем, дещо більший – у 3 % NaCl + 0,025 % NH₄ОН, а найбільший – у вільноаерованому розчині (див. рис. 2).

Покриття з ПД75X19P3C2 виявилось стійкішим до трибокорозії, ніж з ПД 60X15P2ГС у всіх досліджуваних середовищах (див. рис. 2). При цьому ширина доріжки зносу у вільноаерованому розчині відрізняється на 5 %, а в насиченому сірководнем – на ~30 %.

При терті покриттів у середовищі, насиченому сірководнем, також зафіксовано найнижчі значення коефіцієнтів тертя. В аміачному середовищі вони найвищі і сягають 0,5, що може свідчити про абразивний характер зношування (рис. 3).

Трибологічні характеристики покриттів визначаються їх хімічним складом, гетерогенністю структури, співвідношенням міцнісних характеристик її компонентів, рельєфом тощо. Однією з причин кращої зносотривкості покриття з ПД 75X19P3C2 може бути його більша твердість, ніж з ПД 60X15P2ГС, зумовлена вищою концентрацією хрому і вуглецю (див. табл. 1).

Результати, отримані при терті газотермічних покриттів у середовищах, свідчать, що тертя змінює чутливість матеріалу до корозії, оскільки під час фрикційної взаємодії відбувається активація поверхні і зміна її електрохімічного стану, розчинення компонентів покриття і протікання хімічних реакцій у зоні тертя.

Порівняно низькі знос і коефіцієнти тертя у сірководневому середовищі пов'язані з формуванням на поверхні покриттів сульфідних сполук, які при терті виконують роль твердої змазки, зменшуючи адгезійну складову контактної взаємодії, що сприяє зниженню коефіцієнтів тертя і зносу [3; 6; 10].

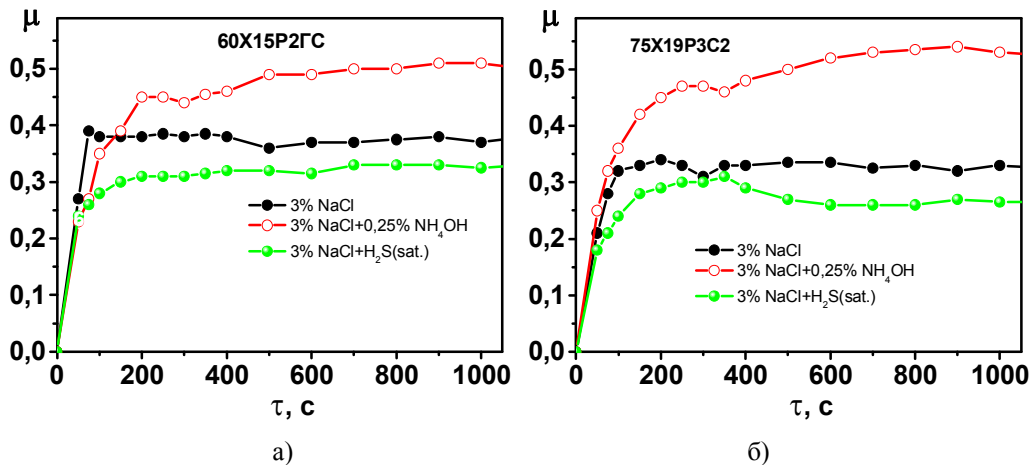


Рис. 3. Коефіцієнти тертя сталей з покриттями, напиленими з ПД 60X15P5ГC (а); 75X19P3C2 (б) у 3 % NaCl; 3 % NaCl + 0,025 % NH₄OH і 3 % NaCl + H₂S.

Fig. 3. Coefficients of friction of steels with coatings, obtained using powder electrodes 60X15P5ГC (a); 75X19P3C2 (б) in 3 % NaCl; 3 % NaCl + 0,025 % NH₄OH; 3% NaCl + H₂S.

Найвищі значення коефіцієнтів тертя виявлено при терті покриттів у середовищі, що містить аміак. В аміачному середовищі у зоні контактування формуються тверді поверхневі азотовмісні плівки з доброю адгезією до ламелей покриття. Їх утворення сприяє підвищенню коефіцієнта тертя, однак ламелярна будова і висока структурна гетерогенність покриттів може сприяти релаксації напружень на локальних ділянках і зменшенню втрат матеріалу [3]. Таким чином, сульфід- і азотовмісні вторинні структури, утворені на поверхні газотермічного покриття у хлоровмісних середовищах, можуть суттєво знизити негативний вплив як корозійного, так і трибологічного чинників. Депасивуючі іони хлору в середовищі пришвидшують корозію покриттів, а сукупна дія корозійного і механічного чинників при терті призводить до зниження зносотривкості.

Висновки

1. Досліджено корозійні і трибокорозійні характеристики електродугових покриттів з ПД 60X15P5ГC і 75X19P3C2 у розчинах 3 % NaCl; 3 % NaCl + NH₃ і 3 % NaCl + H₂S. У всіх середовищах на анодних поляризаційних кривих ЕДП відсутні ділянки пасивації, а значення густини струмів корозії є в межах одного порядку (0,02...0,05 мА/см²). Зі зростанням рН розчинів від 4 до 9 електродні потенціали ЕДП зміщуються в область анодних значень, а струми корозії знижуються, що пов'язано зі стійкістю компонентів покриттів у лужних середовищах. Зі збільшенням концентрації хрому в покриттях їх корозійна тривкість зростає.

2. У сірководневому середовищі на поверхні покриттів формуються сульфідні сполуки, які при терті виконують роль твердої змазки, зменшуючи адгезійну складову контактної взаємодії, що сприяє зниженню коефіцієнтів тертя і зносу матеріалу.

3. В аміачному середовищі в зоні контактування формуються щільні поверхневі азотовмісні плівки. Їх утворення сприяє підвищенню коефіцієнта тертя, однак ламелярна будова і висока структурна гетерогенність покриттів сприяє релаксації напружень на локальних ділянках і зменшенню втрат матеріалу.

4. У вільноаерованому 3 % NaCl трибокорозійна тривкість досліджуваних покриттів нижча, ніж у 3 % NaCl + NH₃ та 3 % NaCl + H₂S. Депасивуючі іони хлору в середовищі пришвидшують корозію покриттів, а сукупна дія корозійного і механічного чинників при терті призводить до зниження зносотривкості.

5. Сульфід- і азотовмісні вторинні структури, утворені на поверхні газотермічного покриття в корозійних середовищах, можуть суттєво знизити негативний вплив як корозійного, так і трибологічного чинників.

Бібліографічний список

1. Газообразивная износостойкость при повышенных температурах покрытий, полученных дуговой металлизацией / В. Похмурский, М. Студент, А. Похмурская, И. Рябцев, В. Гвоздецкий, Т. Ступницкий. *Автоматическая сварка*. 2013. № 6. С. 16–23.
2. Засади створення корозійностійких електродугових покриттів із порошкових дрітків / В. По-

- хмурський та ін. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2012. Спецвип. № 9, т. 2. С. 600–606.
3. Корозійні і трибокорозійні властивості плазмових покриттів на основі заліза, нікелю і хрому в середовищах, що містять сірководень, хлориди та аміак / М. С. Хома, Є. Ф. Переплютчіков, Х. Б. Василів, В. А. Винар, І. А. Рябцев, Н. Б. Рацька, В. Р. Івашків. *Наукові нотатки*. 2019. № 66. С. 356–361.
4. Похмурська Г. В., Студент М. М., Похмурський В. І. Газотермічні покриття: навч. посіб. Львів: Простір-М, 2017. 180 с.
5. Похмурський В., Студент М., Ступницький Т., Червінська Н. Структура, механічні та електрохімічні характеристики корозійностійких електродугових покриттів із порошкових дрітків. *Наукові нотатки*. 2013. 2, № 41. С. 127–132.
6. Хома М. С., Івашків В. Р., Галайчак С. А. Вплив структури сталей на корозію, наводнювання та корозійне розтріскування у сірководневих середовищах. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2019. № 2. С. 121–125.
7. An effective approach for creating metallurgical self-bonding in plasma-spraying of NiCr-Mo coating by designing shell-core-structured powders / Tian J.-J. et al. *Acta Materialia*. 2016. 110. P. 19–30.
8. Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures / V. Pokhmurskyi, M. Student, V. Gvozdeckii, T. Stupnytskyi, O. Student, B. Wielage, H. Pokhmurska. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2013. 22. 5. P. 808–819.
9. Bobzin K., Zhao L., Öte M., Königstein T. Novel Fe-based wear and corrosion resistant coatings by three-cathode plasma technology. *Surface and Coatings Technology*. 2017. 318. P. 288–292.
10. Corrosion cracking of ferrite-pearlitic steels of different structure in the hydrogen sulfide environment under static load / M. S. Khoma, V. R. Ivashkiv, M. R. Chuchman, Ch. B. Vasyliv, N. B. Ratska, B. M. Datsko. *Procedia Structural Integrity*. 2018. 13. P. 2184–2189.
11. Corrosion-mechanical resistance of arc-sprayed coatings made from cored powders / M. Student, H. Veselivska, V. Gvozdecki, M. Golovchuk, L. Dzyubyk, Ya. Sirak. *Ukrainian Journal of Mechanical engineering and materials science*. 2008. 4. 1. P. 12–20.
12. Diltthey U., Kabatnik L. Zentral Pulverzufuhr beim Plasmaauftragschweißen. *Schweißen und Schneiden*. 1998. 12. P. 766–771.
13. Hejwowski T. Sliding wear resistance of Fe-, Ni- and Co-based alloys for plasma deposition. *Vacuum*. 2006. 80, 11-12. P. 1326–1330.
14. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures / H. Pokhmurska, M. Student, V. Gvozdeckii, T. Stupnytskyi, V. Pokhmurski, B. Wielage. *Surface and coating technology*. 2013. 220. P. 27–35.
15. Klimpel A., Dobrzański L. A., Lisiecki A., Janicki D. The study of the technology of laser and plasma surfacing of engine valves face made of X40CrSiMo10-2 steel using cobalt-based powders. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. 175, 1–3. P. 251–256.
16. Microstructure, mechanical and tribological properties of plasma-sprayed NiCrAlY-Mo-Ag coatings from conventional and nanostructured powders / Li B. et al. *Surface and Coatings Technology*. 2017. 324. P. 552–559.
17. Pokhmurskyi V., Student M., Chervinska N., Stupnytskyi V. Electrochemical properties of arc sprayed coatings from cored wires on the basis of cheap ferroalloys. *Ochrona przed korozją*. 2013. 11. P. 516–518.
18. Stupnyts'kyi T. R., Student M. M., Pokhmurs'ka H. V., Hvozdet's'kyi V. M. Optimization of the Chromium Content of Powder Wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B Systems According to the Corrosion Resistance of Electric-Arc Coatings. *Materials Science*. 2016. 52. P. 165–172.
19. Voitovych A., Pokhmurs'ka H., Student M., Student O. Microstructure and Abrasive-Wear Resistance of the Vibration-Deposited Metal of Core Wires of the Basic Fe–Cr–B System. *Materials Science*. 2016. 52. P. 365–370.
20. Wear and impact behaviour of High Velocity Air-Fuel sprayed Fe–Cr–Ni–B–C alloy coatings / Bolelli G. et al. *Tribology International*. 2016. 95. P. 372–390.

Стаття надійшла 04.10.2019

Розділ 6
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ.
УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ ТА ПРОГРАМАМИ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

УДК 005: 631

**СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЕННЯ РИЗИКІВ НЕСВОЄЧАСНОГО
ВИКОНАННЯ РОБІТ В ІНТЕГРОВАНІХ ПРОЕКТАХ**

**Анатолій Тригуба¹, д. т. н.,
Інна Тригуба, к. с.-г. н.¹, Оксана Фтома¹,
Ігор Кондисюк², Назар Коваль²**

¹*Львівський національний аграрний університет
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: trianamik@gmail.com, oksanka_dancer@ukr.net, trinle@ukr.net*

²*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Україна, e-mail: ldubzh.lviv@dsns.gov.ua*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.123>

Тригуба А., Тригуба І., Фтома О., Кондисюк І., Коваль Н. Системний підхід до оцінення ризиків несвоєчасного виконання робіт в інтегрованих проектах

Обґрунтовано потребу розвитку науково-методичних засад управління ризиками проектів на підставі використання системного підходу до їх формування. Встановлено, що розгляд інтегрованих проектів з позиції системного підходу дає змогу врахувати ризики та обґрунтувати ефективні їх плани, уникнути можливих помилок, а також розробити досконаліші методи, моделі та алгоритми для прийняття управлінських рішень із врахуванням ризику.

Означено нерозв'язану науково-прикладну задачу розробки системного підходу до оцінення ризиків несвоєчасного виконання робіт в інтегрованих проектах. Виконано аналіз взаємозв'язків між базовими та похідними проектами, які інтегровані між собою.

На підставі використання системного підходу до ідентифікації ризиків інтегрованих проектів обґрунтовано, що цей ризик формується у двох взаємозалежних їх складових (базових та похідних проектах). Кількісне оцінення ризиків інтегрованих проектів потребує моделювання кожного з базових та похідних проектів, що дасть змогу врахувати мінливі системні взаємозв'язки між ними та підвищити точність отриманих результатів.

Розроблена структурна схема формування ризику в інтегрованих проектах. Вона ґрунтується на системному підході до розгляду окремих проектів та використанні принципів системотехніки. Використання запропонованого підходу забезпечує врахування мінливих системних взаємозв'язків, які лежать в основі ідентифікації ризику.

Обґрунтовано особливості використання ресурсів в інтегрованих проектах. Встановлено, що для підвищення ефективності управлінського процесу оцінення ризиків несвоєчасного виконання робіт необхідно розробити методи та моделі, які враховуватимуть як мінливі події в кожному з проектів, так і мінливі характеристики їх проектного середовища. Врахування обґрунтованих особливостей під час прийняття управлінських рішень значною мірою вплине на якість розроблення планів реалізації інтегрованих проектів.

Запропонований системний підхід до кількісного оцінення ризику несвоєчасного виконання робіт в інтегрованих проектах ґрунтується на моделюванні виконання робіт в окремих проектах. Також він передбачає прогнозування мінливих подій, що зумовлюють потребу виконання зазначених робіт. Зміна характеристик розподілу обсягу виконання робіт у часі залежно від територіального розташування ресурсів, що залучаються до виконання базових та похідних проектів, є головною підставою для визначення мінімальної віддалі їх переміщення та своєчасного виконання робіт. Використання запропонованого підходу до оцінення ризиків забезпечує мінімізацію ризику несвоєчасності виконання робіт в окремих зонах реалізації інтегрованих проектів.

Ключові слова: інтегровані проекти, управління, ризик, роботи, несвоєчасність.

Tryhuba A., Tryhuba I., Ftoma O., Kondysiuk I., Koval N. System approach to evaluation of the risk of untimely implementation of work in the integrated projects

The article argues the necessity of development of scientific and methodological principles of risk management projects, based on the use of a system approach to risk formation in these projects. Consideration of integrated projects from a system approach position enables concerning of risks and justifying of their effective plans, avoiding of possible mistakes, and developing of advanced methods, models and algorithms for managerial decision-making with risk. The paper recognizes the unresolved scientific and applied task of development of a system approach to assessment of the risks of untimely

execution of work in integrated projects. Relationships are analyzed between basic and derivative projects that are integrated with each other. Basing on use of a system approach to identification of the risks of integrated projects, it is substantiated that this risk is formed by two interrelated components (basic and derivative projects).

Quantitative assessment of the risks of integrated projects requires modeling of each of the basic and derivative projects, which will enable changing of the system relationships between them and improving of the accuracy of results. A structural scheme of risk formation in integrated projects is developed in the work. It is based on a system approach to reviewing of individual projects and using system principles. Using the suggested approach, it is possible to consider the changing system relationships underlying the risk identification. Peculiarities of resource usage in integrated projects are substantiated in the article. It was established that to improve efficiency of management process of assessment of risks of untimely execution of works, it is necessary to develop methods and models that will take into account both changing events in each of the projects and changing characteristics of their project environment. Thus, it causes the risk of untimely execution of works in the integrated projects.

Consideration of significant peculiarities during managerial decision-making will greatly affect the quality of development plans for the integrated projects. The proposed system approach to quantitative evaluation of the risk of untimely execution of works in integrated projects is based on modeling of works in individual projects. It also involves forecasting of the changing events that cause the need to perform these works. Changing the performance distribution of work volume in time, depending on the spatial location of the resources, involved in the implementation of the basic and derivative projects, is the main reason for determination of the minimum delay of their movement and timely work performance. Using the proposed approach for risk assessment, it is possible to minimize the risk of untimely performance of work in certain zones of implementation of the integrated projects.

Key words: integrated projects, management, risk, works, untimely.

Постановка проблеми. Потреба реалізації інтегрованих проектів зумовлена зв'язками між їх продуктами та спільним використанням ресурсів, а також доцільністю узгодження їх в окремих проектах [6; 9; 10; 12; 13]. Багато підприємств реалізовує проекти, які мають технологічні взаємозв'язки між собою. При цьому продукти одних проектів є ресурсом для виконання інших. Водночас у більшості підприємств немає достатньої кількості ресурсів (матеріальних, технічних, людських тощо) для повного ресурсного забезпечення окремих проектів і відсутні кошти для їх придбання. Це призводить до потреби використання спільних ресурсів у множині проектів і розподілу їх між окремими проектами, кожен із яких має свої специфічні ризики. При цьому виникає низка задач щодо ефективного забезпечення інтегрованих проектів потрібними ресурсами та своєчасного виконання робіт у них [6; 12; 13]. Усе це зумовлює об'єктивну необхідність системного управління інтегрованими проектами. Водночас кожен з інтегрованих проектів характеризується ризиками, які мають свою специфіку. Тому потрібно використовувати методології управління проектами, невід'ємною складовою яких є управління ризиками. До вагомих процесів управління ризиками в інтегрованих проектах належить кількісне оцінювання ризиків несвоєчасного виконання робіт [7; 8; 11; 17].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виконаний аналіз чинних науково-методичних засад, методів та моделей управління проектами з урахуванням ризику в різних прикладних сферах

свідчить про те, що ними не враховуються особливості формування ризику в інтегрованих проектах. Це значною мірою впливає на результативність інтегрованих проектів [10].

Водночас існуючі методології [4; 18], які стосується управління ризиками у проектах, та міжнародні стандарти управління проектами [14–16; 19; 20] хоча й передбачають процеси управління ризиками, однак їх використати повною мірою не можна, оскільки вони не враховують зв'язків між інтегрованими проектами, які значною мірою зумовлюють ризик несвоєчасного виконання робіт у них. Інтегровані проекти відрізняються від інших видів проектів як особливостями формування ризику несвоєчасного виконання робіт у базових проектах, що зумовлюються відповідними ризиками у сервісних проектах, так і специфічними для кожного виду проектів мінливими подіями, що зумовлюють ці ризики. Іншими словами, для ефективного управління інтегрованими проектами потрібно обґрунтувати системний підхід до оцінення ризиків несвоєчасного виконання робіт, який враховуватиме взаємозв'язки між складовими цих проектів та особливості формування ризику в них. Отже, існує потреба обґрунтування підходу до оцінення ризиків несвоєчасного виконання робіт в інтегрованих проектах.

Постановка завдання. Мета досліджень – обґрунтувати системний підхід до оцінення ризиків несвоєчасного виконання робіт в інтегрованих проектах.

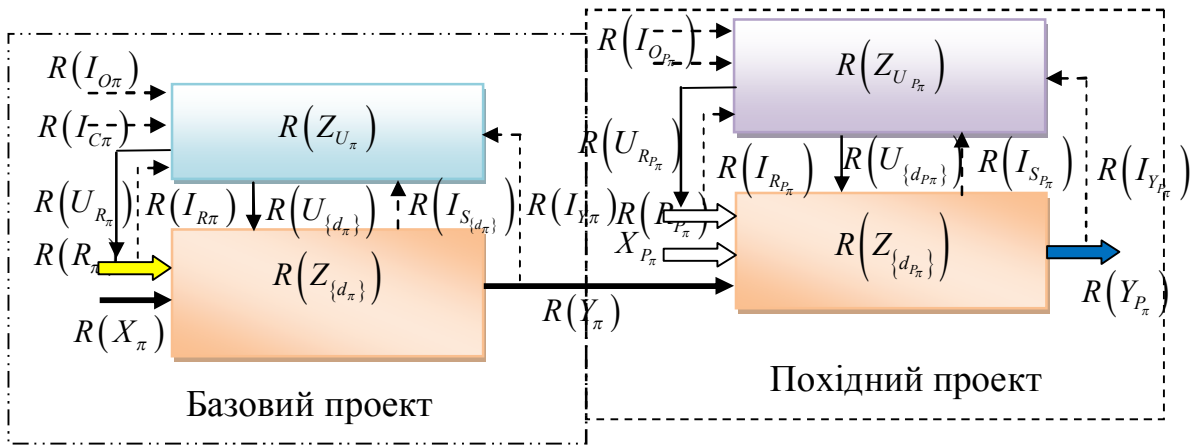


Рис. 1. Структурна схема формування ризику в інтегрованих проектах: $R(Z_{U_{\pi}}), R(Z_{\{d_{\pi}\}})$ – відповідно ризик конфігурації підсистем управління та виконання дій у базовому проекті; $R(X_{\pi})$ – ризик цілей та задач, які необхідно розв’язати завдяки реалізації базового проекту; $R(Y_{\pi})$ – ризик продукту базового проекту; $K(R_{\pi})$ – ризик ресурсів для реалізації базового проекту; $R(I_{O_{\pi}}), R(I_{C_{\pi}}), R(I_{S_{\{d_{\pi}\}}}), R(I_{Y_{\pi}}), R(I_{R_{\pi}})$ – відповідно ризик вчасності надходження та достовірності інформації щодо базового проекту відносно обмежень, проектного середовища, проектних рішень, дій відносно виконання базового проекту та забезпечення ресурсами; $R(U_{\{d_{\pi}\}}), R(U_{R_{\pi}})$ – відповідно ризик управлінських рішень щодо дій відносно виконання базового проекту та потреби в ресурсах; $R(Z_{U_{P_{\pi}}}), R(Z_{\{d_{P_{\pi}}\}})$ – відповідно ризик конфігурації підсистеми управління похідним проектом та дій у ньому; $R(X_{P_{\pi}})$ – ризик оцінення початкового стану об’єкта, на який скерований базовий проект; $R(Y_{P_{\pi}})$ – ризик похідного проекту; $R(R_{P_{\pi}})$ – ризик ресурсного забезпечення; $R(I_{O_{P_{\pi}}}), R(I_{C_{P_{\pi}}}), R(I_{R_{P_{\pi}}}), R(I_{S_{P_{\pi}}}), R(I_{Y_{P_{\pi}}})$ – відповідно ризик вчасності надходження та достовірності інформації щодо похідного проекту відносно обмежень, проектного середовища, ресурсів, похідного проекту та продукту похідного проекту; $R(U_{R_{P_{\pi}}}), R(U_{\{d_{P_{\pi}}\}})$ – ризик управлінських рішень щодо реалізації похідного проекту та потреби в ресурсах для нього.

Fig. 1. Structural scheme of risk formation in integrated projects: $R(Z_{U_{\pi}}), R(Z_{\{d_{\pi}\}})$ – the risk of configuring subsystems of management and execution of actions in the basic project respectively; $R(X_{\pi})$ – the risk of goals and tasks to be solved through the implementation of the basic project; $R(Y_{\pi})$ – product risk of the baseline project; $K(R_{\pi})$ – resource risk for implementation of the basic project; $R(I_{O_{\pi}}), R(I_{C_{\pi}}), R(I_{S_{\{d_{\pi}\}}}), R(I_{Y_{\pi}}), R(I_{R_{\pi}})$ – the risk of timeliness and reliability of information on the basic project concerning the restrictions, project environment, design decisions, actions on the implementation of the basic project and providing resources respectively; $R(U_{\{d_{\pi}\}}), R(U_{R_{\pi}})$ – the risk of managerial decisions on actions regarding the implementation of the basic project and resource needs respectively; $R(Z_{U_{P_{\pi}}}), R(Z_{\{d_{P_{\pi}}\}})$ – the risk of configuration of the derivative project management subsystem and actions respectively; $R(X_{P_{\pi}})$ – the risk of assessing of the initial state of the object, on which the baseline project is directed; $R(Y_{P_{\pi}})$ – the risk of derivative projects; $R(R_{P_{\pi}})$ – the risk of resource support; $R(I_{O_{P_{\pi}}}), R(I_{C_{P_{\pi}}}), R(I_{R_{P_{\pi}}}), R(I_{S_{P_{\pi}}}), R(I_{Y_{P_{\pi}}})$ – the risk of timeliness and authenticity of information on the derivative project in relation to restrictions, project environment, resources, derivative project and product of the derivative project respectively; $R(U_{R_{P_{\pi}}}), R(U_{\{d_{P_{\pi}}\}})$ – the risk of managerial decisions concerning implementation of the derivative project and resource needs for it.

Для досягнення поставленої мети належить розв'язати такі задачі:

- розробити структурну схему формування ризику в інтегрованих проектах;
- обґрунтувати особливості використання ресурсів в інтегрованих проектах;
- запропонувати системний підхід до кількісного оцінення ризику несвоєчасного виконання робіт в інтегрованих проектах.

Основні методи дослідження. Науково-прикладну задачу обґрунтування системного підходу до кількісного оцінення ризику несвоєчасного виконання робіт в інтегрованих проектах розв'язували на основі застосування теорії й методів управління проектами, системного підходу до формування ризику в інтегрованих проектах, аналізу та синтезу, індукції та дедукції.

Виклад основного матеріалу. Розгляд інтегрованих проектів з позиції системного підходу дає змогу врахувати ризики та обґрунтувати ефективні їх плани, уникнути можливих помилок, а також розробити досконаліші методи, моделі та алгоритми для прийняття управлінських рішень із врахуванням ризику. Використання системного підходу уможливорює узгодження дій в інтегрованих проектах з обмеженими ресурсами на підставі врахування мінливих їх складових та проектного середовища, що зумовлюють ризик їх цінності. Кожен із окремих видів інтегрованих проектів можна описати у вигляді системи, яка складається з двох складових, які розглядають як базові та похідні проекти (див. рис. 1).

У похідних проектах на підставі ціле-спрямованих дій (Y_π), які отримуються з базового проекту, упродовж певного часу змінюється стан продукту з початкового (X_{P_π}) на кінцевий (Y_{P_π}) завдяки відповідним перетворенням ($Z_{\{d_{P_\pi}\}}$). Цінність реалізації інтегрованих проектів оцінюється як відносно кожного з проектів, так і завдяки оціненню отриманого їх продукту. Ризик цінності продукту інтегрованих проектів $R(Y_{P_\pi})$ залежить від:

$$R(Y_{P_\pi}) = \left(R(X_{P_\pi}), R(R_{P_\pi}), R(Y_\pi), R(Z_{\{d_{P_\pi}\}}), R(U_{\{d_{P_\pi}\}}), R\{I_i\}, R(T) \right), \quad (1)$$

де $R(X_{P_\pi}), R(R_{P_\pi})$ – ризик початкового та кінцевого стану продукту інтегрованих проектів;

$R(Y_\pi)$ – ризик дій в інтегрованих проектах; $R(Z_{\{d_{P_\pi}\}})$ – ризик перетворень продукту інтегрованих проектів; $R(U_{\{d_{P_\pi}\}})$ – ризик управлінських рішень щодо перетворень продукту інтегрованих проектів; $R\{I_i\}$ – множина ризиків своєчасності та достовірності i -ї інформації щодо формування продукту інтегрованих проектів; $R(T)$ – ризик часу перетворень продукту інтегрованих проектів.

Базові проекти відображаються вхідними впливами (цілями та задачами, які необхідно розв'язати завдяки реалізації базового проекту (X_π) та ресурсами (R_π)), внутрішньою конфігурацією ($Z_{\{d_\pi\}}$), конфігурацією підсистеми управління (Z_{U_π}) та проектними діями, що скеровані на похідний проект (Y_π). Проектні дії стосуються як вхідних впливів похідного проекту (ресурсів (R_{P_π})), так і її внутрішньої конфігурації (підсистеми перетворень $Z_{\{d_{P_\pi}\}}$) та конфігурації підсистеми управління ($Z_{U_{P_\pi}}$). Результатом базового проекту є дії щодо формування продукту похідного проекту, ризик цінності $R(Y_{P_\pi})$ яких залежить від:

$$R(Y_\pi) = \left(R(X_\pi), R(R_\pi), R(Y_\pi), R(Z_{\{d_\pi\}}), R(Z_{U_\pi}), R\{I_i\}, R(T) \right), \quad (2)$$

де $R(X_\pi), R(R_\pi)$ – ризик цілей (завдань) та наявних ресурсів для реалізації інтегрованих проектів; $R(Y_\pi)$ – ризик дій в інтегрованих проектах; $R(Z_{\{d_\pi\}})$ – ризик конфігурації інтегрованих проектів; $R(Z_{U_\pi})$ – ризик управлінських рішень щодо дій в інтегрованих проектах; $R\{I_i\}$ – множина ризиків своєчасності та достовірності i -ї інформації щодо виконання дій в інтегрованих проектах; $R(T)$ – ризик часу виконання дій в інтегрованих проектах.

З позицій класичної теорії систем, статичні зв'язки в інтегрованих проектах розподілені у просторі між їх складовими. Однак із позицій синергетики зазначені зв'язки існують як у просторі, так і в часі (зв'язок часів). Це радикально змінює уявлення про дискретному харак-

тері взаємодій в інтегрованих проектах. Наприклад, наявність та якість ресурсів (матеріальних, технічних) на ринку залежить від обсягів та особливостей їх виробництва в організаціях, що є продуктами базових проектів. Окрім того, з урахуванням часу можна простежити, що обсяги виконаних робіт у похідних проектах та їх якість залежать від обсягів і якості виконаних робіт у базових проектах.

Системотехнікою передбачається здійснювати дослідження складних систем, до яких належать інтегровані проекти, на основі моделювання [2; 5]. На відміну від низки інших прикладних наук, у системотехніці місце теорії в певному сенсі займає модель. Модель інтегрованих проектів дає змогу об'єднувати в одне ціле численні складові цих проектів та зв'язки між ними. Також на підставі моделі можна простежити мінливість складових інтегрованих проектів і зв'язків у часі і вплив на їх ризики, які виникають в окремих проектах. У багатьох випадках модель дає змогу виявити нові властивості систем, котрі не проглядаються під час аналізу відомими закономірностями через їх складність, неспівставність та мінливість структури, що зумовлює появу ризику. Модель перевіряють на адекватність за допомогою порівняння контрольних результатів з експериментальними даними. Якщо вони не збігаються, то модель коригують. Способи побудови моделей можуть бути різними. Важливо, щоб вони були адекватні зі системами, що моделюються.

Принципи та концепція системотехніки є важливим методичним апаратом для обґрунтування цих особливостей, їх мінливості та відповідно кількісного оцінення ризику у проектах. Водночас якраз ці особливості вимагають розроблення специфічних наукових методів управління зазначеними системами з врахуванням ризику.

Враховуючи принципи гомеостатичності та ієрархічності систем, необхідно зазначити, що існує така конфігурація інтегрованих проектів, яка забезпечує виконання заданих цілей у межах допустимих ризиків (витрат ресурсів, часу, якості тощо), та забезпечувати мінімальний ризик запланованої цінності для зацікавлених сторін. Будь-який проект, у тому числі й інтегровані проекти, складається з низки дій, які скеровані на створення цінності від їх продукту відповідно до цілей цього проекту [1; 3]. Формування продукту інтегрованих проектів здійснюється поетапно завдяки виконанню окремих дій у різних системах та за мінливого проектного середовища, що також значною мірою впливає на їх ризик.

Однією із задач щодо управління інтегрованими проектами є ідентифікація та кількісне оцінення ризику несвоєчасного виконання робіт. При цьому визначальними є наявні ресурси (технічне оснащення, виконавці, витратні матеріали тощо) для виконання робіт. Визначення потрібної кількості ресурсів для заданого обсягу робіт є важливою задачею для окремих проектів, які інтегровані між собою. У цьому разі визначають технологічно потрібну оптимальну кількість ресурсів – таку їх кількість, яка унеможливує виникнення втрат через несвоєчасність виконання робіт. Іншими словами, це така кількість ресурсів, що унеможливує несвоєчасність виконання робіт у проектах ($P_n \rightarrow 0$).

Оптимальна кількість ресурсів для реалізації інтегрованих проектів – це така їх кількість, за якої питомі зведені витрати коштів на виконання робіт у них (B_3) та питомі втрати через несвоєчасність їх виконання (B_n) є мінімальними. Графічна інтерпретація визначення технологічно потрібної та оптимальної кількості ресурсів зображена на рис. 2.

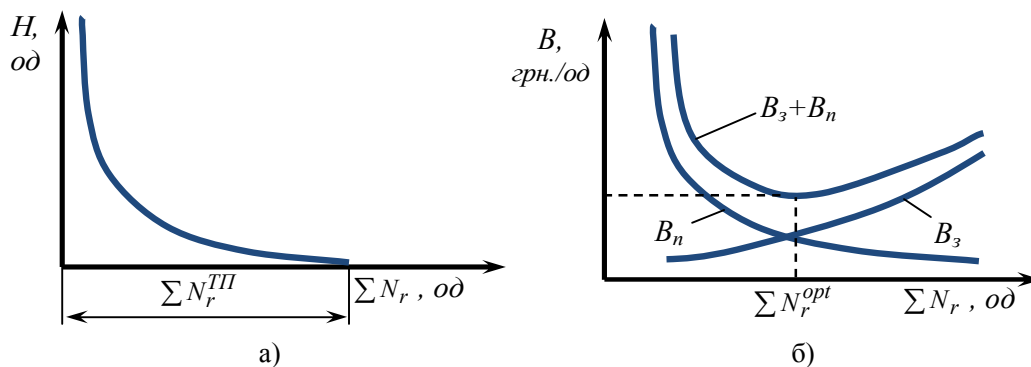


Рис. 2. Графічна інтерпретація обґрунтування потрібної кількості ресурсів для реалізації інтегрованих проектів: а) технологічно потрібна – $\sum N_r^{III}$; б) оптимальна – $\sum N_r^{opt}$

Fig. 2. Graphical interpretation of justification for the necessary number of resources to implement integrated projects: а) technologically required – $\sum N_r^{III}$; б) the optimum – $\sum N_r^{opt}$

Технологічно потрібна кількість ресурсів ($\sum N_r^{\text{III}}$) є завжди більшою від оптимальної ($\sum N_r^{\text{opt}}$). За формування технологічно потрібного обсягу ресурсів для реалізації інтегрованих проектів втрати від несвоєчасного виконання робіт будуть відсутні. За оптимального ресурсного забезпечення проектів допускаються незначні втрати від несвоєчасного виконання робіт в інтегрованих проектах.

Для моделювання виконання робіт в інтегрованих проектах розглядають події, що зумовлюють їх виконання у тому чи іншому проекті. На основі проведених досліджень [7] встановлено, що поява подій має стохастичний характер, чим зумовлюється ризик. У тому чи іншому проекті обсяг виконання робіт розподілено в часі. Очевидно, що зі збільшенням масштабів проектів, а також території, на яких вони реалізуються, обсяг виконання робіт у часі змінюватиметься, що зумовлюватиме ризик несвоєчасного їх виконання через неузгодженість із наявними ресурсами (рис. 3).

Зміна характеристик розподілу обсягу виконання робіт у часі залежно від їх територіального виконання є головною підставою для визначення мінімальної віддалі територіального переміщення ресурсів. Воно ґрунтується на мінімізації ризику несвоєчасності виконання робіт в окремих територіальних зонах.

Науково-методичні засади розв'язку означеної задачі розглянемо на прикладі (рис. 4). Якщо для заданого проектного середовища існує територіальне розмежування окремих проектів, що забезпечує поділ території на зони поєднання виконання робіт в інтегрованих проектах за такими варіантами (рис. 3): 1) 1+2; 2) 2+3; 3) 3+4; 4) 1+3; 5) 2+4; 6) 1+4, то очевидним буде, що ризик несвоєчасного виконання робіт (P_n) буде найменшим для суміжних зон, тобто для варіантів 1, 2, 3. Він буде суттєво більшим для варіантів 4 і 5. І цей ризик буде зростати, коли виконуватимуться роботи спочатку у першій зоні, а пізніше у четвертій. Графічна інтерпретація оцінення ризику несвоєчасності виконання робіт в інтегрованих проектах зображена на рис. 4.

Таким чином, розв'язання задачі оцінення ризиків несвоєчасного виконання робіт в інтегрованих проектах має ґрунтуватися на системному підході та наукових принципах системотехніки, а також аналізі та синтезі базових і похідних проектів. Імітаційне моделювання виконання робіт в інтегрованих проектах, що виконуються спільними ресурсами та мають різне територіальне розосередження, забезпечує їх оптимізацію з врахуванням ризиків несвоєчасності робіт в окремих проектах.

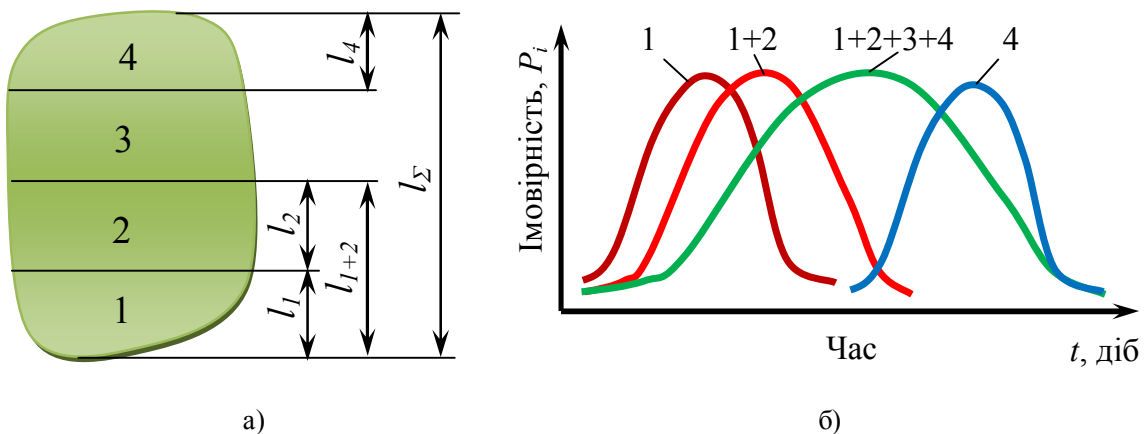


Рис. 3. Масштаби інтегрованих проектів із поділом території, на яких вони реалізуються (а), та зміна параметрів ризику несвоєчасного виконання робіт (б) за різного об'єднання цих територій

Fig. 3. Scales of the integrated projects with division of the territory of their implementation (a), and change of the parameters of risk of untimely execution of work (b) under various amalgamation of those territories

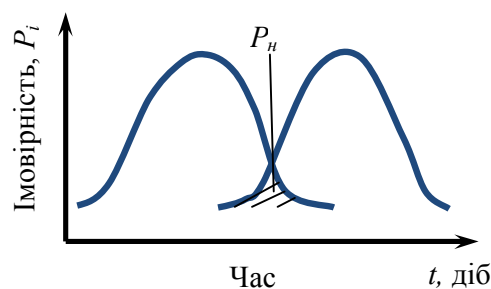
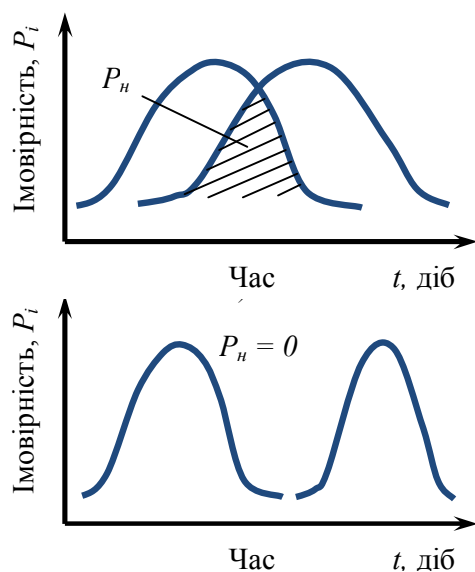


Рис. 4. Графічна інтерпретація кількісного оцінення ризику несвоєчасного виконання робіт в інтегрованих проектах для варіантів: а – 1,2,3; б – 4,5; в – 6.

Fig. 4. Graphical interpretation of the quantitative risk of untimely performance of works in integrated projects for the variants: а – 1, 2, 3; б – 4,5; в – 6.

Висновки

1. Розроблена структурна схема формування ризику в інтегрованих проектах ґрунтується на системному підході до розгляду окремих проектів та використанні принципів системотехніки, що забезпечує врахування мінливих системних взаємозв'язків, які лежать в основі ідентифікації ризику.

2. Обґрунтовані особливості використання ресурсів в інтегрованих проектах свідчать про те, що для підвищення ефективності управлінського процесу оцінення ризиків несвоєчасного виконання робіт потрібно розробити методи та моделі, які враховуватимуть як мінливі події у кожному з проектів, так і мінливі характеристики їх проектного середовища, що зумовлюють відповідний ризик. Врахування цих особливостей під час прийняття управлінських рішень значною мірою вплине на якість розроблення планів реалізації інтегрованих проектів.

3. На підставі використання системного підходу до ідентифікації ризиків інтегрованих проектів обґрунтовано, що ці ризики формуються у двох взаємозалежних їх складових (базових та похідних проектах). Обґрунтовано, що кількісне оцінення ризиків інтегрованих проектів потребує моделювання кожного з базових та похідних проектів, що дасть змогу врахувати мінливі системні взаємозв'язки між ними та підвищити точність отриманих результатів.

4. Зміна характеристик розподілів обсягів виконання робіт у часі залежно від територіального розташування ресурсів, що залучаються до виконання базових та похідних проектів, є

головною підставою для визначення мінімальної віддалі їх переміщення. Це забезпечує мінімізацію ризику несвоєчасності виконання робіт в окремих територіальних зонах реалізації інтегрованих проектів.

Бібліографічний список

1. Бурков В. Н., Данев Б. В., Еналеев А. К. Большие системы: моделирование организационных механизмов. Москва: Наука, 1989. 245 с.
2. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. Москва: Наука, 1978. 399с.
3. Бушуев С. Д. Ценностный подход в управлении развитием сложных систем. *Збірник наукових праць Київського національного університету будівництва та архітектури: управління розвитком складних систем.* 2010. Вип. 1. С. 10–15.
4. Данченко О. Б. Огляд сучасних методологій управління ризиками в проектах. *Управління проектами та розвиток виробництва.* 2014. № 1(49). С. 16–25.
5. Дружинин В. В., Контров Д. С. Системотехника. Москва: Радио и связь, 1985. 200 с.
6. Ідентифікація ризиків цінності проектів створення кооперативів кормозабезпечення сімейних молочних ферм / А. Тригуба, О. Фтома, І. Тригуба, Л. Сидорчук, О. Боярчук. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження.* 2018. № 22. С. 177–186.
7. Планування проектів вирощування сільськогосподарських культур на основі статистичного імітаційного моделювання: монографія / В. В. Адамчук, О. В. Сидорчук, П. М. Луб та ін. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М. М., 2014. 224 с.
8. Тимочко В. О., Падюка Р. І., Городецький І. М. Структурна модель інформаційної системи прийняття рішень з управління ресурсами у портфелі проектів сільськогосподарського підприємства. *Вісник націо-*

нального технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. 2016. № 2 (1174). С. 49–54.

9. Тригуба А. М. Класифікація та особливості реалізації інтегрованих проектів аграрного виробництва. *Науковий журнал національного технічного університету: управління проектами, системний аналіз і логістика*. 2011. № 8. С. 197–201.

10. Тригуба А. М. Системно-проектні основи управління розвитком технологічних структур виробництва молочної продукції: дис. ... д-ра техн. наук. Одеса, 2017. 516 с.

11. Тригуба А. М., Тригуба І. Л., Боярчук О. В., Рудинець М. В. Ідентифікація конфігурації проектного середовища та проектів кормозабезпечення сімейних молочних ферм. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет»*. Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. 2018. № 1(1277). С. 64–68.

12. Тригуба А. М., Шелега О. В., Пукас В. Л., Михалюк В. М. Узгодження конфігурацій інтегрованих проектів аграрного виробництва. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет»*. Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. 2015. № 2 (1111). С. 135–140.

13. Тригуба А. М., Шолудько П. В., Сидорчук Л. Л., Боярчук О. В. Системно-ціннісні засади уп-

равління інтегрованими програмами розвитку молочарства на основі моделювання. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. 2016. № 2 (1174). С. 103–107.

14. IEE Std 828-1998 / IEEE Standard for Software Configuration Management Plans, IEEE, 1998.

15. IPMA Organizational Competence Baseline (IPMA OCB). IPMA. 2013. URL: www.ipma.world/assets/IPMA-OCB/pdf (Last accessed: 17 September 2019).

16. ISO 21500. 2012. Guidance on project management. URL: <http://www.projectprofy.ru/> (Last accessed: 17 September 2019).

17. Krasowski E., Sydorчук O., Sydorчук L. Modeling and Management of the Technical and Technological Potential in Agricultural Production. *Teka: an international quarterly journal on economics in technology, new technologies and modelling processes*. 2015. No. 15(4). С. 79–84.

18. Kutsch E., Hall M. Deliberate ignorance in project risk management. *International Journal of Project Management*. 2010. 28. P. 245–255.

19. PRIENCE2. Managing successful project with PRIENCE2. London: TSO, 2009. 315 p.

20. Regulation EU 882/2004. About official control, carried out in order to ensure compliance checks on legislation concerning food and feed, and the rules for the health and welfare of animals. Approved. 2004. From 29.04.2004.

Стаття надійшла 26.09.2019

Розділ 7
**ІНЖЕНЕРІЯ БЕЗПЕКИ ДОВКІЛЛЯ ТА БЕЗПЕКИ
АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА**

УДК 631.1-331.45

**ВИЗНАЧЕННЯ РИЗИКУ ТРАВМУВАННЯ ПІД ЧАС ТРАКТОРНИХ РОБІТ
НА ОСНОВІ ДЕФЕКТОСКОПІЧНОГО КОНТРОЛЮ**

**Олександр Войналович¹, к. т. н., Василь Тимочко², к. т. н.,
Олег Гнатюк¹, к. т. н., Іван Городецький², к. т. н.**

¹*Національний університет біоресурсів і природокористування,
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна,
e-mail: voynalov@bigmir.net*

²*Львівський національний аграрний університет,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н,
Львівська обл., Україна,
e-mail: tymochko_vo@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.131>

Войналович О., Тимочко В., Гнатюк О., Городецький І. Визначення ризику травмування під час тракторних робіт на основі дефектоскопічного контролю

Наголошено на актуальності встановлення ступеня небезпеки експлуатації мобільної техніки з вичерпаним ресурсом або перевищенням гарантійним терміном експлуатації. Для оцінення залишкового ресурсу техніки пропонується застосовувати ймовірнісні методи, в основу яких покладено максимально повне врахування організаційних і технічних чинників, які описують вплив виробничого середовища на умови експлуатації машин. Розроблено комплексний метод оцінення професійного ризику за тривалої експлуатації мобільної техніки з урахуванням впливу організаційної (помилки механізаторів і керівників робіт) та технічної (наявність експлуатаційних пошкоджень деталей) груп чинників. Показано, що побудова моделей небезпечних виробничих ситуацій має враховувати багато передумов: помилкові дії працівників, відмови техніки і несприятливі зовнішні впливи виробничого довкілля.

Результати розрахунку елементів логіко-імітаційної моделі процесу перебігу травмонебезпечної ситуації дозволяють оцінити ризик травмування працівників, які експлуатують машинно-тракторні агрегати, зокрема внаслідок накопичення експлуатаційних пошкоджень у відповідальних деталях вузлів. Отримані значення, що відповідають недопустимому професійному ризику, можуть бути підставою для встановлення нормативних термінів технічного обслуговування спрацьованої мобільної техніки та заміни пошкоджених деталей.

Показано, що порівняльний аналіз розрахункових значень професійного ризику трактористів-машиністів до і після усунення технічних і організаційних недоліків дає змогу виокремити найнебезпечніші елементи виробничої діяльності механізаторів, наочно пояснити їм ризикованість виконання окремих технологічних операцій без технічних засобів захисту та з порушенням чинних вимог безпеки, що дозволить знизити виробничий травматизм.

Ключові слова: професійний ризик, небезпечна ситуація, логіко-імітаційна модель, дефектоскопічний контроль.

Voinalovych O., Tymochko V., Hnatiuk O., Horodetskyi I. Calculation of the risk of tractors operation on the basis of defectoscopic control data

The article emphasizes importance to estimate the degree of danger of mobile equipment operation with exhausted life or exceeded warranty period of operation. To estimate the residual life of the machinery, the authors of the article propose to use probabilistic methods, which are based on maximum consideration of organizational and technical factors that describe impact of production environment on the operating conditions of the machines.

The research proposes a complex method of estimation of the professional risk under long-term exploitation of mobile agricultural machinery with consideration of the influence of organizational (errors of machine operators and job managers) and technical (presence of operational damages of parts) factors. It is argued that construction of the models of hazardous production situations should take into account many prerequisites, i.e. mistakes of workers, technological failures, and unfavorable external influences of production medium.

Results of calculating of the elements of a logic-simulation model of the process of the traumatic situation secure estimating of the risk of injury for workers, who use mobile agricultural machinery, in particular due to accumulation of

operational damage in the responsible parts of the nodes. The obtained values, which correspond to unacceptable occupational risk, should serve as a basis for observance of normative terms of passing of maintenance of mobile equipment and replacement of damaged parts.

It is determined that comparative analysis of the calculated values of professional risk of tractor drivers, before and after elimination of technical and organizational defects, allows distinguishing the most dangerous elements of production activity of machine-operators, clear explaining of the risk of separate technological operations with no technical means of protection and violation of current safety requirements, which will reduce occupational injuries.

Key words: professional risk, dangerous situation, logic-simulation model, defectoscopic control.

Постановка проблеми. Незважаючи на придбання аграрними підприємствами сучасної мобільної сільськогосподарської техніки, в експлуатації досі перебувають трактори та сільськогосподарські машини застарілих моделей та після тривалих термінів роботи. Умови експлуатації сільськогосподарських агрегатів зумовлюють високі рівні термосилового й корозійного навантаження на деталі і системи машин, що призводить до виникнення експлуатаційних дефектів. Статистика дорожньо-транспортних пригод за участі тракторів і нещасних випадків у польових умовах показує, що часто причинами аварійних ситуацій є дефекти у відповідальних деталях машин і агрегатів. Тому актуальним є встановлення ступеня небезпеки експлуатації мобільної техніки, коли практично вичерпано її ресурс або гарантійний термін експлуатації перевищено в кілька разів. Для оцінення залишкового ресурсу техніки, з погляду безпеки її експлуатації, доцільно застосовувати ймовірнісні методи, в основу яких покладено максимально повне врахування організаційних і технічних чинників, які описують вплив виробничого середовища на умови експлуатації машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи, які нині рекомендують застосовувати для оцінення небезпеки експлуатації складних технічних систем, мають комплексно враховувати небезпечні (помилкові) дії операторів машин та можливі відмови окремих елементів систем [6; 11; 15; 16]. Однак здебільшого в розрахункових моделях переважають чинники, які зумовлені помилковими діями працівників, тобто є організаційними [2; 5; 7–9]. Обґрунтуванням такого підходу є статистика причин виробничого травматизму, де переважають організаційні причини [2; 19]. Через це розрахунково-логічні моделі виглядають явно спрощеними, а для зниження ймовірності нещасних випадків на виробництві пропонують, як правило, заходи контрольно-навчального характеру.

Це можна пояснити відсутністю статистичних даних щодо відмов (несправностей) для певних видів техніки та нечіткістю задавання

ймовірностей виходу з ладу окремих елементів (ланок, вузлів) чи руйнування деталей, що визначають безпечну роботу машини. На сьогодні таку статистику відмов достатньо об'єктивно встановлено для об'єктів атомної енергетики, металургії та хімічної промисловості [1; 20], зруйнування систем яких може призвести до масштабних аварій та нещасних випадків. Для мобільної сільськогосподарської техніки статистику можливих дефектів деталей систематизовано [4], але без пов'язування з динамікою розвинення дефектних станів протягом експлуатації машини.

Нині питанням надійності, довговічності та прогнозування залишкового ресурсу мобільної сільськогосподарської техніки приділяють значну увагу [3; 4; 14; 18]. Але в цих роботах не знайшли достатнього відображення проблеми захисту операторів, як однієї з основних ланок системи «людина – машина – довкілля». Тому важливим є розроблення підходів щодо оцінення ризиків для операторів та інших працівників, які експлуатують техніку з дефектними деталями, а також з урахуванням тривалості накопичування дефектів у різних деталях.

Постановка завдання. Наше завдання – розробити метод розрахунку ризику небезпечної ситуації на механізованих роботах сільського господарства з урахуванням помилок працівників (механізаторів і керівників робіт) та наявності експлуатаційних дефектів у деталях вузлів машин після тривалої їх експлуатації.

Виклад основного матеріалу. У роботі для розрахунку ризику настання аварійних ситуацій за тривалої експлуатації тракторів було використано метод «дерева відмов» [10; 12; 13; 17]. Цей метод передбачає послідовне виконання таких етапів алгоритму:

- аналіз виробничого процесу з виокремленням кінцевого небезпечного наслідку, який може призвести до нещасного випадку;
- структурування моделі «дерева відмов» на основі якісного аналізу процесу;
- кількісне оцінення ризику базових подій, з яких будують «дерево відмов»;

– математичний аналіз моделі і розрахунок ризику кінцевої події.

В основу методу «дерева відмов» покладено встановлення головної (кінцевої) події, що може відбутися через небезпечну ситуацію, та умов і обставин, тобто передумов, які цю подію зумовлюють, – небезпечні (помилкові) дії працівників, несприятливі впливи виробничого середовища, довкілля та вихід з ладу елементів техніки. «Дерево відмов» будують на основі встановлення зв'язків між цими передумовами, які можуть бути умовними і безумовними. Структуру «дерева відмов» зображено на блок-схемі (рис. 1).

Метод побудови моделі «дерева відмов» дає змогу встановити не тільки ймовірність небезпечної події, а й виокремити небезпечні ланцюги проміжних подій, виявити значущість базисних (початкових) подій, розробити заходи для зниження ймовірності небезпечної події. Починають будувати «дерево відмов» зі встановлення небезпечної базової події, яку надалі з використанням логічних операторів розкладають на відповідні складові – події, які формують головну (кінцеву) подію. У цій роботі ризик настання аварійних ситуацій для розробленої моделі перебігу травмонебезпечної ситуації розраховували за допомогою комп'ютерної програми *SAPHIRE* [2] з використанням критеріїв Фусела – Весели та Бірнбаума для оцінення значущості базових подій.

Показник значущості за Бірнбаумом $B(x)$ події x визначають як похідну ймовірності небажаної події P щодо ймовірності базової події x [2]:

$$B(x) = \frac{d}{dx} P(x). \quad (1)$$

Показник значущості Фусела – Весели FV події x розраховують як відносний внесок цієї події до ймовірності настання небажаної події:

$$FV = \frac{F(x) - F(0)}{F(x)}. \quad (2)$$

Оцінюючи значущість базових подій під час дослідження логічної моделі, можна встановити пріоритетні (оптимальні) напрями впливу на їх значення, що дасть змогу знизити ймовірності настання небезпечних подій і відповідно зменшити професійний ризик.

Однією з небезпечних подій під час експлуатації машинно-тракторних агрегатів є раптове опускання навісної системи трактора, у деталях якої внаслідок тривалої експлуатації виникають і поширюються тріщини. Тому будують модель і розраховують ймовірності. Модель такої травмонебезпечної ситуації показано на рис. 2.

Окремі елементи цієї моделі з певними значеннями базових подій наведено в табл. 1, зокрема для випадків критичного накопичення тріщин у відповідальних деталях трактора (елемент J). Наявність тріщин у деталях вузлів тракторів МТЗ-80(82) з різними термінами експлуатації було оцінено методом неруйнівного контролю – за допомогою спеціалізованого вихрострумового дефектоскопа ВД-12НФМ. Дефектоскопічний контроль у ремонтних підрозділах виконували під час дефектування деталей тракторів (загалом таким методом було проконтрольовано 52 трактори, які перебували в експлуатації до 16 років з дати випуску).

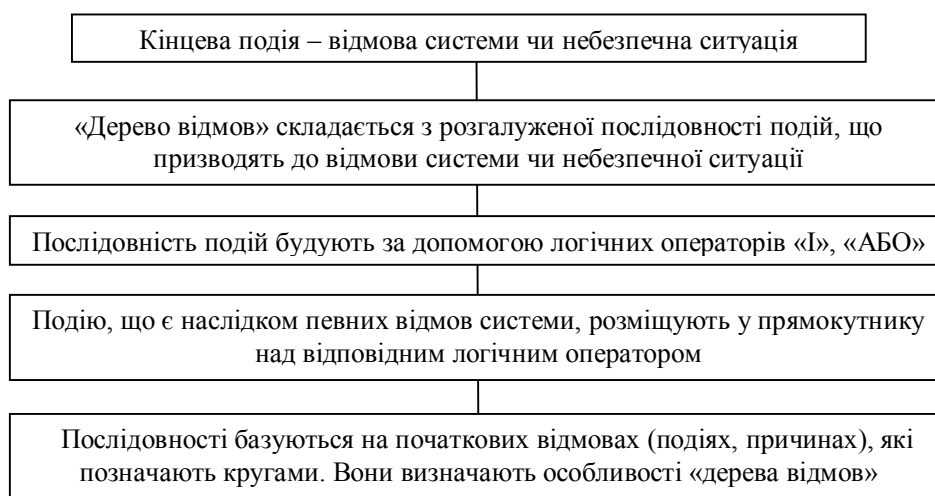


Рис. 1. Блок-схема структури «дерева відмов»

Fig. 1. Flow block of the structure of «Fault tree»

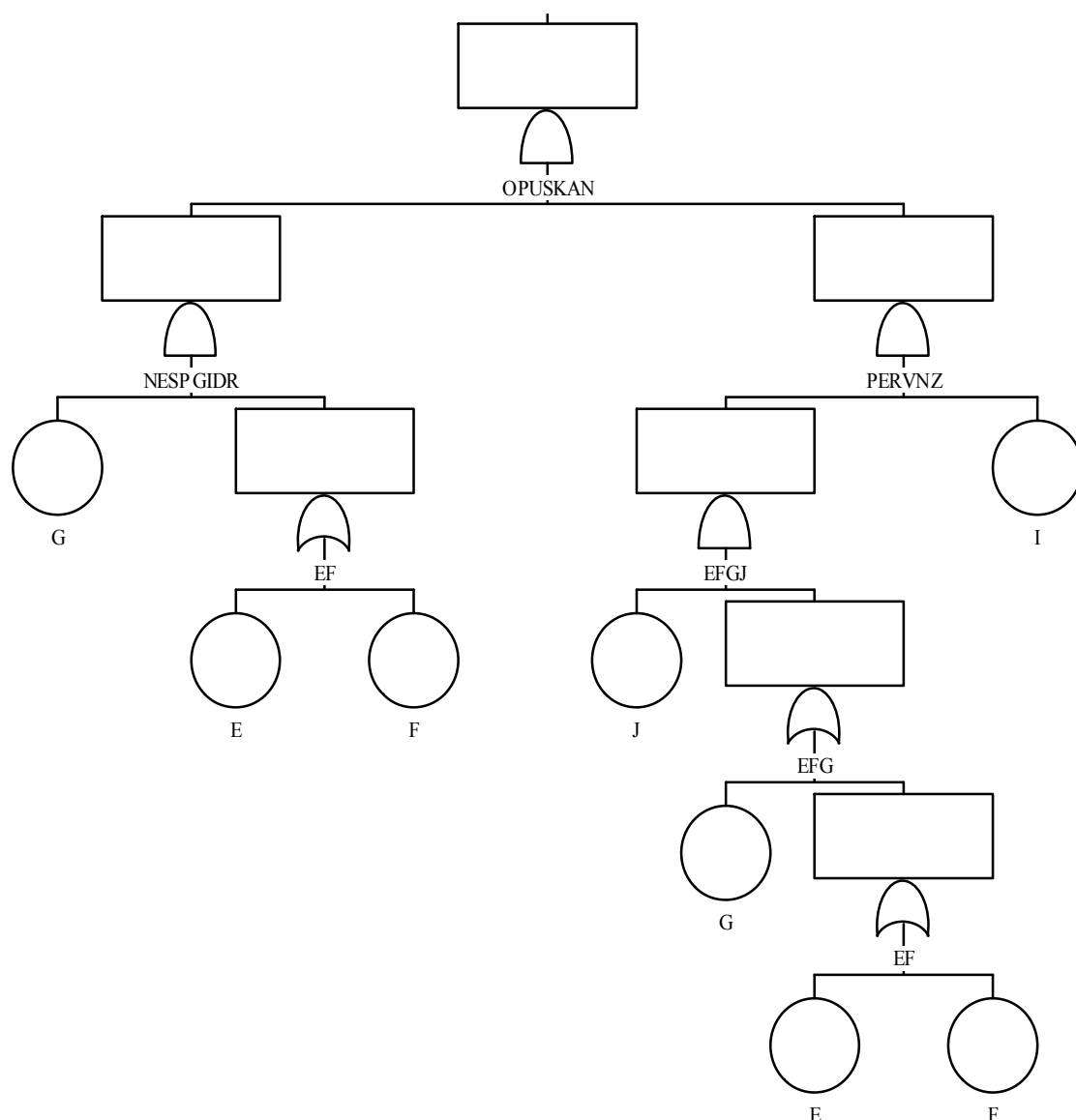


Рис. 2. Блок-схема логіко-імітаційної моделі небезпечної ситуації «раптове опускання навісного знаряддя трактора»

Fig. 2. Flow block of a logic-simulation model of a dangerous situation «sudden lowering of the tractor's attachment»

Ймовірності базових подій у розглянутій моделі небезпечної ситуації задано згідно зі статистичними показниками травматизму в аграрному виробництві України, які було усереднено за останні п'ять років (наведено у щорічних статистичних бюлетенях «Травматизм на виробництві» Державної служби праці України).

Розрахунок виконано для двох термінів експлуатації тракторів, а саме 8 та 16 років, коли відносна кількість тріщин у загальному масиві досліджених деталей трактора становила відповідно 0,2 і 0,45 [12].

Зміни показників виробничого ризику для окремих елементів моделі небезпечної ситуації показують, як зростає ризик травмування в разі проміжного та повного впливу небезпечного чинника (табл. 2).

З табл. 2 видно, що ризик травмування працівників унаслідок раптового опускання навісного знаряддя трактора збільшується у 2,25 раза після досягнення критичної щільності експлуатаційних тріщин у деталях навісної системи трактора. Це є підставою для рекомендування скорочення термінів технічного огляду тракторів зі значним напруженням і терміном експлуатації.

Таблиця 1. Опис елементів моделі небезпечної ситуації

Table 1. Description of the elements of a model of hazardous situations

Позначення елементів (подій)	Опис елементів (базових і проміжних подій)	Задана ймовірність базових подій
E	На аграрному підприємстві не створено служби охорони праці	0,15
F	На підприємстві не налагоджено ефективної роботи з охорони праці (не проводять навчань та інструктажів з питань охорони праці, не контролюють технічного стану машин та обладнання щодо їх безпечності, не визначають професійної придатності працівників тощо)	0,25
EF	Контроль з безпеки праці на підприємстві	<i>P</i>
G	Недостатній рівень кваліфікації працівників (механізаторів)	0,15
EFG	Порушення нормативних термінів проходження технічного огляду та обслуговування тракторів	<i>P</i>
J	Наявність експлуатаційних тріщин у деталях вузла	0,2/0,45
EFGJ	Експлуатація трактора з несправною навісною системою	<i>P</i>
I	Необхідність виконання технологічних операцій та оглядів для усунення недоліків у роботі навісної системи чи інші причини, які змушують працівника (механізатора) перебувати у небезпечній зоні опускання навісного наряддя трактора	0,25
PERVNZ	Перебування працівника в небезпечній зоні опускання навісного знаряддя	<i>P</i>
OPUSKAN	Раптове опускання навісного знаряддя	<i>P</i>

Таблиця 2. Показники ризику для моделі небезпечної ситуації «раптове опускання навісного знаряддя трактора»

Table 2. Risk indices for the model of a dangerous situation of «sudden lowering of the tractor's attachment»

Небезпечний чинник (дія, подія, ситуація)	Умовна характеристика небезпечного чинника – відносна кількість тріщин у загальній кількості досліджених деталей трактора	Розрахований показник ризику <i>P</i>	Зміна показника ризику за наявності небезпеки, разів
<i>J</i> (наявність тріщин у деталях вузла)	0,2	$2,998 \cdot 10^{-3}$	–
	0,45	$6,739 \cdot 10^{-3}$	2,25

Висновки

1. Запропоновано комплексний метод оцінювання ризику за тривалої експлуатації мобільної техніки з урахуванням впливу організаційного (помилки механізаторів і недоліки у роботі керівників робіт) та технічного (наявність експлуатаційних пошкоджень деталей) чинників. Показано, що метод «дерева відмов» дає змогу кількісно аналізувати ймовірності виникнення травмонебезпечних ситуацій під час використання машинно-тракторних агрегатів на механізованих процесах в АПК через декомпозицію подій, що впливають на створення небезпечної ситуації.

2. Результати розрахунку елементів моделі травмонебезпечної ситуації дають змогу оцінити ризик травмування працівників під час роботи машинно-тракторних агрегатів, їх обслуговування, зокрема внаслідок накопичення

експлуатаційних дефектів у відповідальних деталях вузлів тракторів.

3. Отримані значення розрахункового ризику можуть бути підставою для встановлення термінів проходження технічного обслуговування мобільної техніки та заміни пошкоджених деталей.

Бібліографічний список

1. Аверин Г. В., Москалец В. М. Анализ опасностей аммиачных компрессорных установок методом построения «дерева отказов». *Екологічна безпека*. 2008. № 3-4. С. 9–16.
2. Авраменко Н. Л., Березовецький А. П., Городецький І. М., Тимочко В. О. та ін. Безпека трудових відносин в умовах реформування економіки України: кол. монографія / за наук. ред. доц. В. І. Федорчук-Мороз. Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2019. 192 с.

3. Аулін В. В., Каліч В. М., Гриньків А. В., Голуб Д. В. Прогнозування залишкового ресурсу агрегатів та систем транспортних засобів сільськогосподарського виробництва за їх технічним станом. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2015. Вип. 45(2). С. 28–36.
4. Аулін В. В., Кузик О. В. Динамічне матеріалознавство зон тертя деталей сільськогосподарської техніки. *Вісник Житомирського національного аграрно-екологічного університету*. 2014. Вип. 2 (45), т. 4, ч. 2. С. 102–110.
5. Бегун В. В. Задача определения текущего риска объекта повышенной опасности. *Математичні машини і системи*. 2011. № 1. С. 120–126.
6. Вычужанин В. В., Рудниченко Н. Д. Оценки структурного и функционального рисков сложных технических систем. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Т. 1, № 2 (67). С. 18–22.
7. Городецький І., Березовецький А., Городецька Н. та ін. Використання методик аналізу небезпек процесів для удосконалення управління охороною праці. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2014. № 18. С. 5–8.
8. Городецький І. М., Мазур І. Б., Городецька Н. Г., Березовецький А. П. Вплив обставин на формування небезпечних ситуацій аграрного виробництва. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2017. № 21. С. 162–166.
9. Єсипенко А. С., Сліпачук О. А., Оберемок Г. О. Небезпечні дії працівників як причина нещасних випадків на виробництві. *Проблеми охорони праці в Україні*. Київ: ННДІПБОП, 2013. Вип. 25. С. 46–58.
10. Копей Б. В., Мартинець О. Р. Використання «дерева відмов» як методу структурного аналізу штангової насосної установки. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 2(47). С. 62–71.
11. Москвина Е. А., Извеков Ю. А., Гугина Е. М., Шеметова В. В. Модельный анализ характеристик ущерба сложных технических систем металлургического предприятия. *Современные наукоемкие технологии*. 2019. № 3-2. С. 217–221.
12. Полянський О. С., Войналович О. В., Мотрич М. М. Оцінення небезпеки експлуатації сільськогосподарських агрегатів за даними дефектоскопії деталей. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, 2018. Вип. 190. С. 185–192.
13. Ришков В. Г., Кожемякін Г. Б., Манідіна Є. А. Використання «дерева подій» для аналізу травматизму та аварій на металургійних підприємствах. *Металургія: наукові праці Запорізької державної інженерної академії*. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2015. Вип. 1 (33). С. 100–104.
14. Скобцов И. Г. Оценка вероятности безотказной работы системы ROPS лесозаготовительных машин с позиций механики разрушения. *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. 2015. № 4 (149). С. 89–94.
15. Таїрова Т. М. Методологічні засади моніторингу виробничого травматизму: монографія. Київ: Основи, 2014. 201 с.
16. Тимочко В. О., Городецький І. М., Березовецький А. П. Оцінка ризику під час роботи на металообробних верстатах токарної групи. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2018. № 22. С. 22–29.
17. Халіль В. В., Глива В. А. Аудит ризиків безпеки на робочому місці. *Технологический аудит и резервы производства*. 2016. Вип. 2/3(28). С. 12–17.
18. Popovych P. V., Lyashuk O. L., Murovanyi I. S. et al. The service life evaluation of fertilizer spreaders undercarriages. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 50, issue 3. P. 39–46.
19. Skorupka D. Metod of planning construction projects taking into account risk factors. *Operation Research and Decision*. 2009. Vol. 19, No. 3. P. 119–128.
20. Voort M. M. van der, Klein A. J. J., Maaijer M. de et al. A quantitative risk assessment tool for the external safety of industrial plants with a dust explosion hazard. *Loss Prev. Process Ind.* 2007. No. 4-6. P. 375–386.

Стаття надійшла 01.10.2019

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОВНІШНЬОГО ШУМУ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБІЛЯ

Олег Миронюк, к. т. н., Віктор Шевчук, к. т. н.
Львівський національний аграрний університет
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н,
Львівська обл., Україна,
e-mail: omiron66@gmail.com

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.137>

Миронюк О., Шевчук В. Теоретичні дослідження зовнішнього шуму легкового автомобіля

Розглянуто питання впливу транспортного шуму на психоемоційний стан водія. Проведене дослідження джерел зовнішнього шуму легкового автомобіля Renault Symbol на різних експлуатаційних режимах роботи. Встановлені спектри частот, що найістотніше впливають на зовнішнє середовище. Розроблена модель визначення шуму в розрахунковій точці зовні автомобіля дає змогу визначити частку всіх основних джерел шуму автомобіля, що сприятиме вибору раціональної методології зниження шуму автомобіля в цілому. Запропонована модель враховує шум трансмісії, шин коліс і структурний шум; дозволяє визначити рівень звуку для легкових автомобілів з передніми ведучими рушійми, де моторно-трансмісійна установка є єдиним цілим; враховує шум, що проникає через нижній передній отвір під бампером і передній отвір через радіатор; враховує структурний шум, що створюється трансмісією; дає змогу виділити шуми з різних джерел – структурного і повітряного, а отже, знизити шум окремих джерел; дозволяє за допомогою розрахунків оцінити очікуваний рівень зовнішнього шуму автомобіля за його технічною характеристикою і вже під час проектування вибрати найраціональніший спосіб досягнення допустимих норм. Запропонована модель може бути використана під час розрахунку зовнішнього шуму не тільки автомобіля Renault Symbol, а й інших передньопривідних легкових автомобілів середнього класу з об'ємом двигуна 1,4–1,8 л, що може суттєво зменшити витрати на випробування й оцінку відповідності цих автомобілів нормованим вимогам. Модель дає змогу вже на стадії проектування автомобіля вибрати найефективніші способи доведення його за зовнішнім шумом.

Ключові слова: зовнішній шум легкового автомобіля, спектр шуму, джерела шуму, розрахункова модель.

Myroniuk O., Shevchuk V. Theoretical research of the car external noise

The article studies influence of traffic noise on the psycho-emotional state of the driver. The research examined outside noise sources of the Renault Symbol car in different operating modes, and determined the frequency spectra of noise that make the most significant influence on the external environment. The developed model for determining the noise at the reference point of outside the car allows defining of the proportion of all main sources of car noise, which help to choose rational methodology for reducing the noise of the car generally. The proposed model considers transmission noise, wheel tires, and structural noise. The model allows determining the sound level for cars with front-wheel drive, where the engine and transmission make a single unit; consider the noise income through the lower front opening under the bumper and the front opening through the radiator. The model takes into account the structural noise, generated by the transmission; allows isolating of the noise from different sources, i.e. structural and air, and therefore reduces the noise of individual sources; allows estimating of the expected level of external noise of the car referring to its technical characteristics. The model supplies choice of the most rational way of achieving of the allowable standards of noise level while designing. This model can be used to calculate the external noise of not only Renault Symbol automobile, but also other mid-range passenger cars with a 1,4-1,8 l engine capacity, which can significantly reduce the costs of testing and assessing of these cars accordance to the standard requirements. The model assists in choice of the most effective ways to reduce the external noise already at the stage of car designing.

Key words: outside car noise, noise spectrum, noise sources, calculation model.

Постановка проблеми. Шум автомобіля є проявом високочастотних динамічних процесів, що відбуваються в механізмах машин. Як відомо, на сьогодні легкові автомобілі є найрозповсюдженішими шумо-віброактивними машинами в життєвому просторі людини, і транспортний шум становить реальну небезпеку здоров'ю людини.

Це вказує на актуальність вирішення існуючої проблеми. Рівень шуму транспортних засобів є істотним аспектом сучасного життєвого простору людини, джерелом фізичного забруднення довкілля. Вивченню джерел шуму, який створюється легковим автомобілем, присвячене це дослідження.

Вплив шуму на психічний стан людини зростає зі збільшенням його інтенсивності, а також зменшенням ширини октавних смуг у спектральному відношенні. Постійні або періодичні перевищення регламентованих рівнів звуку на окремих октавах або їх сукупності можуть зумовити адекватні зміни фізіологічного стану людини, у тому числі розвиток передчасної втоми і, як наслідок, зниження продуктивності праці та збільшення кількості помилок під час роботи, особливо на великих автомагістралях. Тому вивчення спектрального шуму з погляду впливу на людину є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження багатьох вчених [1–3; 8; 16] свідчать, що під час руху автомобіля ним випромінюється шум, який створюється двигуном, системою випуску відпрацьованих газів, елементами трансмісії, шинами коліс, у результаті завихрення повітря. Кожна складова проявляється по-різному і має домінуюче значення для певних режимів роботи автомобіля.

Згідно з даними [7] основним джерелом шуму є шум від кочення коліс по дорожньому полотну, тому вирішення цієї проблеми можливе, наприклад, заміною бетонного покриття рівним асфальтовим.

Деякі вчені [8; 11] впевнені, що знизити шум від транспорту в містах за допомогою традиційних методів достатньо складно і це вимагає суттєвих матеріальних витрат. Доступнішим є контроль і зниження шуму від джерел його виникнення, у нашому випадку рівня шуму, що генерується від автомобілів (зокрема легкових, частка яких у сумарному транспортному потоці найістотніша).

Враховуючи, що шум випуску є найсильнішим джерелом зовнішнього шуму автомобіля, дослідження стосовно механізму його виникнення проводило багато дослідників. На думку В. М. Луканіна [10], причиною виникнення шуму випуску є протікання відпрацьованих газів з великою внутрішньою енергією через випускний клапан. Проведені дослідження показують, що сумарний рівень низькочастотного шуму випуску вищий, ніж високочастотного.

Силовa передача легкового автомобіля містить муфту зчеплення, коробку передач, головну передачу, диференціал, привідні вали, які збуджують вібраційні коливання і є причиною акустичного випромінювання з поверхні кузова автомобіля [1; 10]. Під час роботи підшипників кочення виникають також імпульсні збурення

внаслідок хвилястості бігових доріжок, овальності тіл кочення і наявності радіальних зазорів [17]. Основними чинниками, що впливають на значення ефективного звукового тиску під час роботи зубчастої передачі, є колова сила і кутова швидкість [15]. Дослідник В. Є. Тольський [17] стверджує, що на шум основних елементів трансмісії найістотніше впливає навантаження. Простежується закономірність, що зі зростанням потужності від 3 до 30 кВт рівень шуму коробки передач зростає на 10 дБА.

Як зазначає О. Петренко [14], шини виступають основним джерелом шуму в процесі випробування за методикою, регламентованою вимогами ISO 362, Правилами № 51 ЄЕК ООН, SAE J470, згідно з якими швидкість руху автомобіля не перевищує 60 км/год. Якщо швидкість руху перевищує 80 км/год, шум шин часто перевершує всі інші його джерела.

Підсумовуючи викладене, можна стверджувати, що в процесі руху автомобіля він випромінює шум, що створюється двигуном, агрегатами трансмісії автомобіля, кузовом (під дією двигуна, дороги і потоку повітря) і допоміжним устаткуванням. Кількісно оцінити складові шуму автомобіля експериментальним шляхом доволі складно. Аналізуючи частотний спектр шуму, можна виокремити окремі його джерела утворення. Наприклад, якщо різні джерела шуму проявляються в різних частотних діапазонах, їх можливо легко розділити, незважаючи навіть на близькість їх енергетичних рівнів. Проте окремі джерела шуму автомобіля, як правило, проявляються у широкому спектрі частот, не маючи чітко вираженої вузької частотної смуги.

Загалом можна стверджувати, що рівень зовнішнього шуму автомобіля залежить від багатьох чинників, які необхідно враховувати під час розрахунків.

Постановка завдання. Важливим є встановлення залежності шуму автомобіля і його окремих агрегатів від особливостей конструкції та режимів роботи. Зовнішній шум автомобіля найістотніше залежить від режиму роботи двигуна і типу дорожнього покриття й може змінюватися в широкому діапазоні. Тому метою дослідження є встановлення джерел випромінювання шуму легкового автомобіля та проведення спектрального аналізу шуму для різних експлуатаційних умов роботи.

Виклад основного матеріалу. До сучасного автомобіля ставляться підвищені вимоги

безпеки, у тому числі й щодо шумового навантаження [4; 5]. Легковий автомобіль має джерела шуму різної акустичної потужності, з якого формується сумарне звукове поле навколо автомобіля [19]. Джерелами шуму виступають: двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ), системи випуску відпрацьованих газів, випуску повітря, трансмісія, ходова частина [12; 13].

Запропонована методика дає змогу провести розрахунок зовнішнього шуму, який створюється зазначеними складовими, включаючи структурний шум, що передається через тверді тіла (рис. 1).

Сумарний рівень шуму в розрахунковій точці визначають сумуючи рівні звуку від кожного з джерел на основі відомої формули додавання звукового тиску [9; 10]:

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i} \quad (1)$$

У разі розрахунку для автомобіля Renault Symbol можна записати:

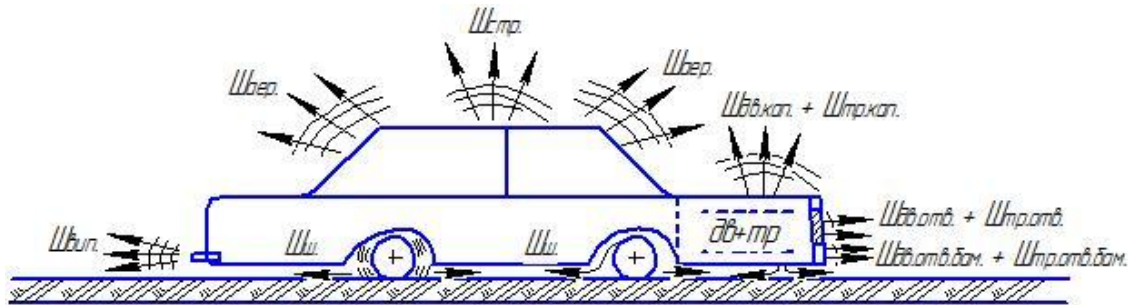


Рис. 1. Схема джерел зовнішнього шуму автомобіля:

$Ш_{дв.кап.}$ – шум двигуна, що проникає через капот; $Ш_{тр.кап.}$ – шум трансмісії, що проникає через капот; $Ш_{дв.отв.}$, $Ш_{дв.отв.бам.}$ – шум двигуна, що проникає через передній і нижній отвори відповідно; $Ш_{тр.отв.}$, $Ш_{тр.отв.бам.}$ – шум трансмісії, що проникає через передній і нижній отвори відповідно; $Ш_{аер.}$ – аеродинамічний шум; $Ш_{вип.}$ – шум випуску відпрацьованих газів; $Ш_{ш.}$ – шум пневматичних шин; $Ш_{ст.}$ – структурний шум кузова від двигуна і трансмісії.

Fig. 1. Scheme of the car external noise sources:

$Ш_{дв.кап.}$ – engine noise penetrating through the bonnet; $Ш_{тр.кап.}$ – transmission noise penetrating through the bonnet; $Ш_{дв.отв.}$, $Ш_{дв.отв.бам.}$ – engine noise penetrating through the front and bottom openings; $Ш_{тр.отв.}$, $Ш_{тр.отв.бам.}$ – transmission noise penetrating through the front and bottom openings; $Ш_{аер.}$ – aerodynamic noise; $Ш_{вип.}$ – exhaust gases noise; $Ш_{ш.}$ – noise of pneumatic tires; $Ш_{ст.}$ – structural noise of the body from the engine and transmission.

На основі моделі розрахунку шуму [9; 17] узагальнений вираз для розрахунку шуму, що проникає через капот і систему випуску, запишеться так:

$$L_i = L_{Wi} + C_1(\omega) - \bar{3I} + b_i - a_i + 10 \lg(1 - \bar{\alpha}_s) + PC - \beta - C - X, \quad (3)$$

де L_{Wi} – рівень звукової потужності i -го джерела; b_i – показник, що враховує співвідношення між площами панелі капота, отворами капота і загальною площею капота; a_i – показник, що враховує

$$L_{авт} = 10 \lg(10^{0,1L_{дв.кап.}} + 10^{0,1L_{дв.пр.пр.}} + 10^{0,1L_{дв.н.пр.}} + 10^{0,1L_{дв.н.пр.пр.}} + 10^{0,1L_{тр.кап.}} + 10^{0,1L_{тр.пр.пр.}} + 10^{0,1L_{тр.н.пр.}} + 10^{0,1L_{тр.н.пр.пр.}} + 10^{0,1L_{вип.}} + 10^{0,1L_{ш}} + 10^{0,1L_{ст.дв.}} + 10^{0,1L_{ст.тр.}} + 10^{0,1L_{аер.}}), \quad (2)$$

де $L_{дв.кап.}$ – шум двигуна, що проходить через капот; $L_{дв.отв.рад.}$ – шум двигуна, що проходить через отвір решітки радіатора; $L_{дв.н.отв.}$, $L_{тр.н.отв.}$ – відповідно шум двигуна і трансмісії, що проходить через нижній отвір; $L_{дв.отв.бам.}$ – шум двигуна, що проходить через нижній отвір під бампером; $L_{тр.кап.}$ – шум трансмісії, що проходить через капот; $L_{тр.отв.рад.}$ – шум трансмісії, що проходить через отвір решітки радіатора; $L_{тр.отв.бам.}$ – шум трансмісії, що проходить через нижній отвір під бампером; $L_{вип.}$ – шум випуску відпрацьованих газів; $L_{ш}$ – шум шин; $L_{ст.дв.}$, $L_{ст.тр.}$ – структурний шум кузова відповідно від двигуна і трансмісії; $L_{аер.}$ – аеродинамічний шум.

відстані від джерела шуму до розрахункової точки і висоту отворів; PC – показник спрямованості; $\bar{\alpha}_s$ – середній коефіцієнт звукопоглинання; β – коефіцієнт, що враховує розташування джерела шуму; C – коефіцієнт проникнення (у разі проникнення шуму через панелі огорожі $C = 12,5$, через відкритий отвір – $C = 14$, у відкритий простір – $C = 0$); X – коефіцієнт, що враховує кут випромінювання, який для $\Omega = \pi$ дорівнює 5 дБ, для $\Omega = 2\pi$ – 8 дБ, для $\Omega = 4\pi$ – 11 дБ

(Ω – просторовий кут випромінювання джерел, у разі випромінювання у відкритий простір він становить 4π , у напівпростір – 2π , у двограний кут – π); $C_1(\omega)$ – показник розраховується за формулою

$$C_1(\omega) = 10 \lg \left(\frac{\chi_{\text{кан.}}}{r 4\pi^2 r_{\text{де.}}} + \frac{4\psi_{\text{кан.}}}{B_{\text{кан.}}} \right), \quad (4)$$

де $\chi_{\text{кан.}}$ – коефіцієнт, що враховує вплив ближнього звукового поля; r – відстань від двигуна до розрахункової точки, м; $r_{\text{де.}}$ – відстань від двигуна до панелі капота, м; $\psi_{\text{кан.}}$ – коефіцієнт, що враховує порушення дифузії звукового поля; $B_{\text{кан.}}$ – стала капота, м², визначається з виразу

$$B_{\text{кан.}} = A_{\text{кан.}} / (1 - \bar{\alpha}_{\text{кан.}}), \quad (5)$$

де $A_{\text{кан.}}$ – звукопоглинання капота, м²;

$$A_{\text{кан.}} = \bar{\alpha}_{\text{кан.}} S_{\text{кан.}},$$

тобто це добуток середнього коефіцієнта звукопоглинання конструкції капота $\bar{\alpha}_{\text{кан.}}$ і загальної площі панелей капота $S_{\text{кан.}}$, м²;

\bar{Z} – зведена звукоізоляція капота, дБ, яку визначають за формулою

$$\bar{Z} = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{кан.}i}}{\sum_{i=1}^n S_{\text{кан.}i} \times 10^{0,1(\bar{Z}_{\text{кан.}i} + t_{\text{кан.}i})}}, \quad (6)$$

де $S_{\text{кан.}i}$ – площа i -тої панелі капота, м²; n – кількість панелей капота; $\bar{Z}_{\text{кан.}i}$ – звукоізоляція i -тої панелі капота, дБ; $t_{\text{кан.}i}$ – добавка до звукоізоляції панелей капота залежно від їх розташування відносно розрахункової точки, дБ (дорівнює 0, якщо поверхня розташована навпроти розрахункової точки, 5 дБ – на бічних або верхній панелі капота, 8 дБ – на задній відносно розрахункової точки панелі капота).

Частку шуму двигуна в розрахунковій точці визначають як суму рівнів шуму складових: шуму, що проходить через капот (панелі огорожі), шуму, що проходить через нижній отвір у решітці радіатора, шуму, що проходить через передній відкритий отвір у решітці радіатора, шуму, що проходить через нижній отвір під бампером. Таким чином, отримуємо вираз:

$$L_{\text{де.}} = 10 \lg (10^{0,1L_{\text{де.кан.}}} + 10^{0,1L_{\text{де.отв.пад.}}} + 10^{0,1L_{\text{де.н.отв.}}} + 10^{0,1L_{\text{де.отв.бам.}}}). \quad (7)$$

Частку шуму від трансмісії в розрахунковій точці визначають як суму рівнів таких складових: шуму, що проникає через панелі огорожі трансмісії (капот), шуму, що проникає через нижній отвір решітки радіатора, шуму, що проникає через передній відкритий отвір, і шуму,

що проникає через нижній передній отвір під бампером. Враховуючи вираз (2), отримаємо:

$$L_{\text{мп.}} = 10 \lg (10^{0,1L_{\text{мп.кан.}}} + 10^{0,1L_{\text{мп.отв.пад.}}} + 10^{0,1L_{\text{мп.н.отв.}}} + 10^{0,1L_{\text{мп.отв.бам.}}}). \quad (8)$$

Користуючись відомим виразом (3), визначимо шум системи випуску відпрацьованих газів, що проникає до розрахункової точки:

$$L_{\text{вун.}}^{7,5} = L_{W_{\text{вун.}}} + C_1(\omega) - a_3 + PC - \beta_{\text{вун.}} - x, \quad (9)$$

де $L_{W_{\text{вун.}}}$ – спектр звукової потужності випуску відпрацьованих газів; a_3 – коефіцієнт, який визначаємо за формулою

$$a_3 = 20 \lg R_{\text{вун.}} / r_{\text{вун.}}, \quad (10)$$

де $R_{\text{вун.}}$ – відстань від отвору випускної труби до розрахункової точки, м; $r_{\text{вун.}} = 0,25$ м; PC – показник спрямованості випуску (якщо вихлопна труба спрямована вгору, то $PC = 0$, якщо в бік робочого місця, то $PC = 4$ дБ, якщо в протилежний бік, то $PC = -4$ дБ); $\beta_{\text{вун.}}$ – коефіцієнт, що враховує розташування випускної труби на автомобілі (якщо труба виводиться вгору, $\beta_{\text{вун.}} = 0$, якщо вбік – 5 дБ, якщо за капот – 8 дБ); x – визначається з виразу (3).

На утворення шуму шини впливає низка її конструктивних параметрів: форма елементів протектора; зміна кроку його рисунка; форма, глибина і число канавок, безперервність канавки. Шум шин вираховуємо за формулою [6]:

$$L_{\text{ш.}} = 30 \lg V_a + 30 \lg B - 50, \quad (11)$$

де V_a – швидкість руху автомобіля, км/год; B – ширина профілю шини, мм.

Вібраційні коливання відіграють помітну роль у процесі утворення шуму в автомобілях. Найбільший вплив у діапазоні 31,5–1000 Гц, що пояснюється вібраційною активністю таких джерел, як ДВЗ, коробка передач [17].

Утворення шуму двигуна характерне для всіх тактів робочого циклу, особливо це стосується процесу згоряння палива і моментів відкриття й закриття клапанів, коли інтенсивне утворення шуму відбувається у вигляді короткочасних імпульсів. Під час проходження тактів робочого циклу виникає звукове (акустичне) випромінювання під дією: тиску газів, реактивного моменту, збурення у впускних і випускних системах, сил, що виникають в агрегатах і механізмах двигуна [10].

Згинальні і крутильні коливання, які виникають у трансмісії автомобіля, можуть також слугувати причиною шуму, що випромінюється деталями кузова. Силова передача автомобіля, до складу якої входять муфта зчеплення, коробка передач, головна передача, диференціал, привідні

вали, є джерелом вібраційних коливань і причиною акустичного шуму кузова.

Спрощено процес передачі й утворення структурного звуку автомобіля відбувається таким чином. Вібрація від працюючого двигуна і трансмісії передається через опорні подушки на раму, а далі через підлогу на корпус кузова, затухаючи в процесі переходу через з'єднання, і випромінюється в навколишнє середовище.

Значення структурного звуку в розрахунковій точці, дБ [9]:

$$L_{cm}^{pm} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_{cm,i}}, \quad (12)$$

де $L_{cm,i}$ – звук, що випромінюється i -тою поверхнею кузова, дБ; n – число поверхонь кузова (підлога, стіни, стеля).

Якщо прийняти, що підлога – найбільш вібраційно навантажена поверхня кузова, то на основі розрахунку структурного звуку отримано вираз:

$$L_{cm,i} = (L_{cm,підл.} - \Delta i) + 10 \lg \frac{S_i}{\bar{\alpha}} + 10 \lg j_i + PC + 6, \quad (13)$$

де $L_{cm,i}$ – звук, що випромінюється i -тою поверхнею кузова; Δi – поправковий коефіцієнт згасання вібраційних коливань, дБ [17]; S_i – площа коливної поверхні; $\bar{\alpha}$ – коефіцієнт звукопоглинання поверхонь; j_i – коефіцієнт випромінювання звуку i -тою поверхнею стінок кузова,

що залежить від матеріалу й характеру закріплення поверхні конструкції; $L_{cm,підл.}$ – вібрація, що передається від джерела до підлоги кузова,

$$L_{cm,підл.} = L_{дж.в.} - \Delta L_{дж.в.} - \Delta L_{зат.в.} - \Delta L_{стінк.}, \quad (14)$$

де $L_{дж.в.}$ – рівень віброшвидкості на опорних поверхнях джерела вібрації, дБ (відносно стандартного рівня віброшвидкості $V_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ м/с) [18]; $\Delta L_{дж.в.}$ – перепад вібрації на віброізоляторах джерела вібрації, дБ [17]; $\Delta L_{стінк.}$ – перепад вібрації на віброізоляторах стінок кузова, дБ [17]; $\Delta L_{зат.в.}$ – згасання вібраційних коливань у рамних конструкціях, дБ.

Перевірку адекватності моделі проводили за допомогою порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними [20] (рис. 2, 3).

Порівнявши дані, отримані експериментальним і розрахунковим способами, можна стверджувати, що модель адекватна.

Результати розрахунку складових зовнішнього шуму автомобіля Renault Symbol на основі запропонованої моделі зведено в таблиці.

Проведено розрахунки спектрів рівня шуму за характеристикою шумоміра А і спектрів шуму за характеристикою Lin автомобіля Renault Symbol під час руху, стоянки і руху накатом. Результати відображено на рис. 4.

Проведено розрахунок сумарного рівня звуку шин з різною шириною профілю, результати якого подано на рис. 5.

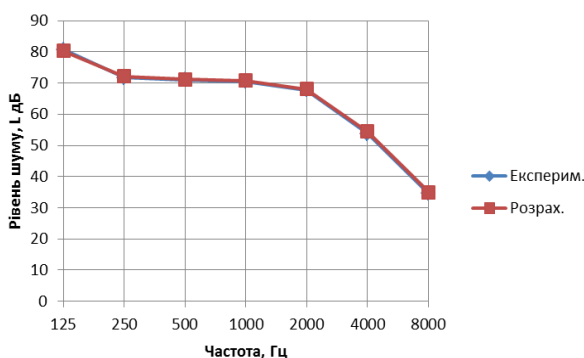


Рис. 2. Спектри рівня шуму автомобіля Renault Symbol під час руху, отримані експериментальним і розрахунковим способами

Fig. 2. Experimental and calculated noise spectra levels of Renault Symbol while driving

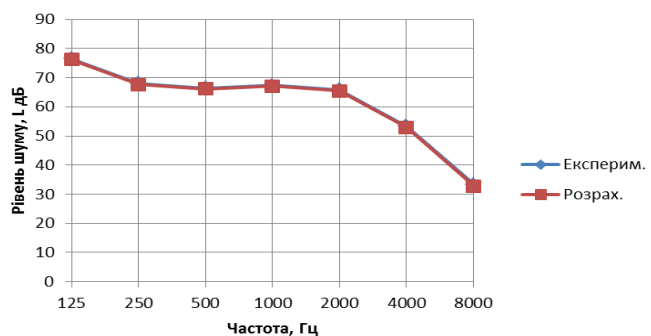


Рис. 3. Спектри рівня шуму автомобіля Renault Symbol під час стоянки, отримані експериментальним і розрахунковим способами

Fig. 3. Experimental and calculated noise spectra levels of Renault Symbol while parking

Таблиця. Результати розрахунку рівня звуку автомобіля Renault Symbol в розрахунковій точці (на відстані 7,5 м від поздовжньої осі автомобіля)

Table. Results of the calculation of the sound level of Renault Symbol car at the reference point (at a distance of 7.5 m from the longitudinal axis of the car)

Джерела шуму	Значення L, А
ДВЗ через капот	60,251
ДВЗ через нижній отвір	71,885
ДВЗ через отвір решітки радіатора	64,891
ДВЗ через нижній отвір під бампером	69,952
Трансмісія через капот	56,446
Трансмісія через нижній отвір	68,125
Трансмісія через отвір решітки радіатора	61,107
Трансмісія через нижній отвір під бампером	64,005
Система випуску відпрацьованих газів	59,883
Шини	66,158
Структурний шум кузова від ДВЗ	61,361
Структурний шум кузова від трансмісії	57,737
Сумарний рівень під час руху	76,33
Сумарний рівень під час стоянки	71,47
Сумарний рівень під час руху накатом	67,15

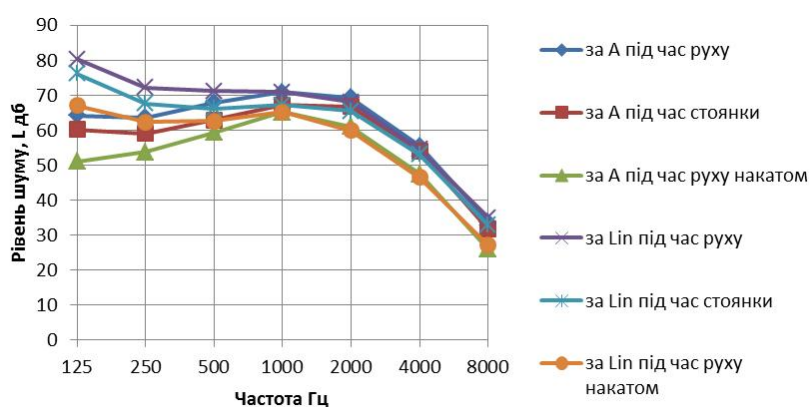


Рис. 4. Спектри рівня шуму за характеристиками шумоміра А і Lin під час руху, стоянки і руху накатом автомобіля Renault Symbol

Fig. 4. Noise level spectra by the characteristics of A and Lin sound level meter during driving, parking and coasting of a Renault Symbol car

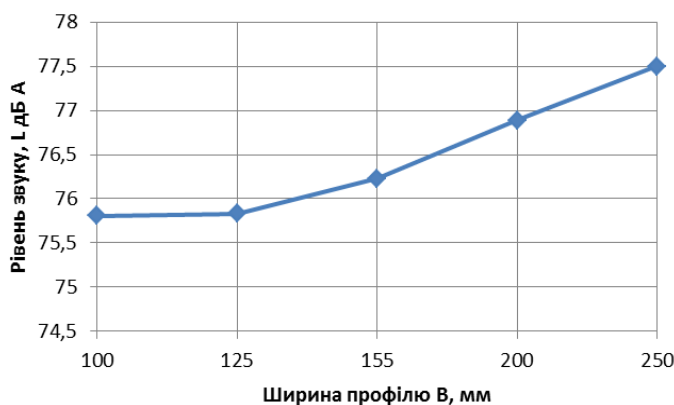


Рис. 5. Розрахунковий рівень звуку шин залежно від їх ширини профілю

Fig. 5. Estimated sound level of the tires, depending on their profile width

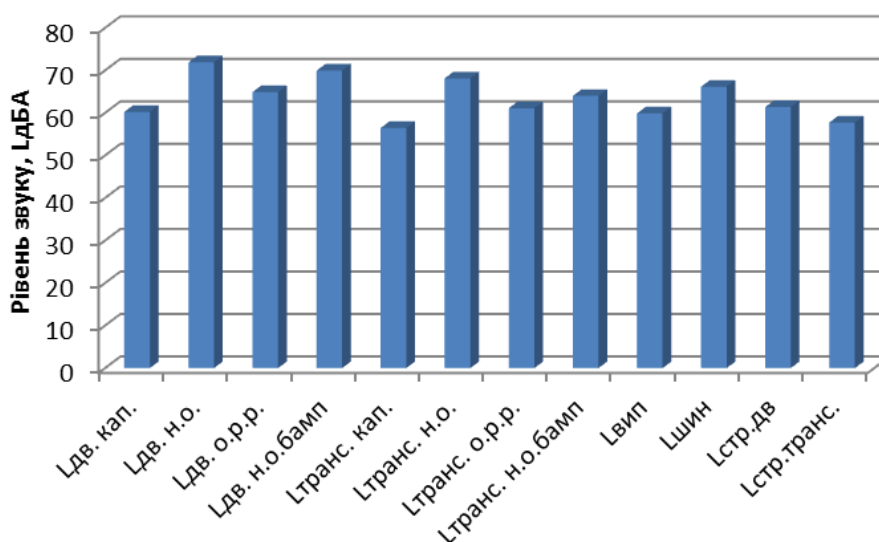


Рис. 6. Рівні звуку різних джерел автомобіля Renault Symbol на відстані 7,5 м від його поздовжньої осі

Fig. 6. Levels of different source sounds of a Renault Symbol car at the distance of 7.5 m from its longitudinal axis

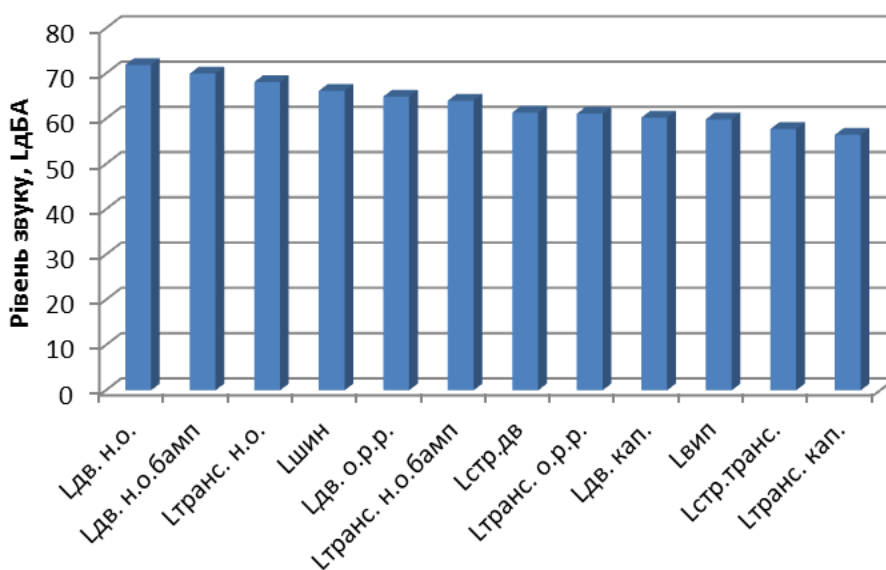


Рис. 7. Ранжирувальний ряд рівня звуку від різних джерел автомобіля Renault Symbol на відстані 7,5 м від його поздовжньої осі

Fig. 7. Ranging level of different source sounds of a Renault Symbol car at the distance of 7.5 m from its longitudinal axis

Одержані на основі розрахунку складові рівня звуку від окремих джерел його отримання для автомобіля Renault Symbol, що визначають рівень зовнішнього шуму для стандартних умов, показано на гістограмі (див. рис. 6).

Для кращого аналізу на рис. 7 ті ж самі складові проранжовані в порядку зменшення їх значущості в сумарному шумі.

На основі аналізу отриманих гістограм можна стверджувати, що найістотніший вплив на

зовнішнє середовище у легкового автомобіля моделі Renault Symbol має шум двигуна, який проникає через нижню частину транспортного засобу. Вагома частка припадає також на шум від пневматичних шин. Для зменшення шуму найдоцільніше, як це впливає з розрахунків, зменшувати площу отворів моторного відсіку завдяки застосуванню звукоізолювальних матеріалів.

Висновки

1. Найбільша частка шуму припадає на ДВЗ, таким чином, основним джерелом шуму у легкових автомобілів Renault Symbol можна вважати двигун.

2. Через відкриті отвори проникає значна частина сумарного шуму. У разі закриття цих отворів сумарний рівень знижується на 8 дБА.

3. Через нижній отвір у розрахункову точку проникає велика частина звуку (72,2 дБА). Якщо зменшити площу цього отвору на 50 %, рівень звуку знизиться на 1,4 дБА.

4. Зниження структурного шуму, що випромінюється корпусними деталями двигуна і трансмісії, на сьогодні є складним технічним завданням. Найдоцільніше, як це впливає з розрахунків, зменшувати площу отворів моторного відсіку завдяки застосуванню звукоізолювальних конструкцій.

5. За допомогою розрахунків отримані спектри шуму. Дані свідчать, що шум, який випромінює автомобіль, переважно перебуває в діапазоні частот від 95 до 1250 Гц.

6. Результати розрахунків спектрів шуму, скоригованих за характеристикою А шумоміра, свідчать, що звук, що випромінюється автомобілем, переважає в діапазоні октавних смуг з частотами 500, 1000 і 2000 Гц. Тому зниження рівня звуку автомобіля можна досягнути за рахунок зменшення рівня звуку спектральних складових вказаного діапазону.

7. Ширина профілю пневматичної шини має вплив на сумарний рівень звуку. Із зменшенням ширини на 55 мм сумарний рівень знижується на 0,33 дБА за швидкості руху 50 км/год.

8. Частка шуму системи випуску відпрацьованих газів практично не чинить впливу на сумарний рівень у розрахунковій точці.

Бібліографічний список

1. Балабин И. В., Куров Б. А., Лаптев С. А. Испытания автомобилей. Москва: Машиностроение, 1988. 192 с.
2. Галевко Ю. В., Щепкин А. И. Европейское нормирование в области ограничения шума транспортных средств. *Журнал автомобильных инженеров*. 2014. № 2(85). С. 6–10.
3. Гудцов В. Н. Современный легковой автомобиль: экология, экономичность, электроника, эргономика. Тенденции и перспективы развития. Москва: КНОРУС, 2016. 448 с.
4. ДСТУ 3649:2010. Колісні транспортні засоби. Вимоги безпеки до технічного стану та методи контролю. Вид. офіц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2010. 110 с.
5. Зотов Л. Л. Экологическая безопасность автомобилей. Санкт-Петербург: СЗТУ, 2005. 115 с.
6. Карпенко В. А. Вопросы шума при взаимодействии шины с дорогой. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2015. № 71. С. 109–111.
7. Карпенко В. А., Левченко А. Н., Бараник И. М. Автомобильная шина как объемный излучатель шума. *Автомобильный транспорт*. 2008. № 23. С. 76–80.
8. Качмар Р. Я. Оцінювання екологічних та економічних втрат від шуму транспортних потоків міста Львова. *Автомобільний транспорт: дослідження*. 2013. № 1(231). С. 10–13.
9. Лепендин Л. Ф. Акустика. Москва: Высш. шк., 1978. 448 с.
10. Луканин В. Н., Гудцов В. Н., Бочаров Н. В. Снижение шума автомобиля. Москва: Машиностроение, 1981. 158 с.
11. Лучко І. А. Результати дослідження шумового навантаження на вулицях, дорогах та проспектах м. Києва. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2010. Вип. 19. С. 188–197.
12. Миронюк О. С. Про джерела зовнішнього шуму легкового автомобіля. *Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв'язання: тези доп. III Всеукр. наук.-теор. конф.*, 28–30 берез. 2019 р. Дрогобич: Посвіт, 2019. С. 92–93.
13. Миронюк О. С., Шевчук В. В., Грабовець В. В. Вплив зовнішнього шуму легкового автомобіля на довкілля. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2019. № 1(12). С. 107–113.
14. Петренко О. Аналіз вимог чинних нормативно-правових актів щодо допустимих рівнів шуму і вібрації автомобіля. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Автоматика вимірювання та керування*. 2013. № 753. С. 152–158.

15. Разумовский М. А. Борьба с шумом на тракторах. Минск: Наука и техника, 1973. 206 с.

16. Самойлюк Е. П., Денисенко В. И., Пилипенко А. П. Борьба с шумом в населенных местах. Киев: Будівельник, 1981. 144 с.

17. Тольский В. Е. Виброакустика автомобиля. Москва: Машиностроение, 1988. 432 с.

18. Хиклинг Р. Аэрогидромеханический шум в технике. Москва: Мир, 1980. 336 с.

19. Mironyuk O., Shevchuk V. Noise load of a car on the environment. *Commission of Motorization and Energetics in Agriculture: An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery*. 2017. Vol. 19, No. 4. P. 19–23.

20. Mironyuk O., Shevchuk V. Spectral analysis of a passenger car vehicle external noise. *Commission of Motorization and Energetics in Agriculture: An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery*. Lublin, 2018. Vol. 20, No. 1. P. 91–94.

Стаття надійшла 01.10.2019

ЗМІСТ

Розділ 1		
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТІВ, СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАТЕРІАЛІВ І СИРОВИНИ		
<i>Крупич Р., Кузенко Л., Крупич С., Левко С., Крупич О.</i>		
Розмірні показники скелетних гілок дерев волоського горіха.....	5	
Розділ 2		
МАШИНИ ТА РОБОЧІ ПРОЦЕСИ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА		
<i>Пасіка В., Коруняк П.</i> Кінематичний аналіз важільного механізму з внутрішньою урухомлювальною ланкою.....		13
<i>Ковалишин С., Швець О., Дадак В., Пташник В.</i> Дослідження процесу електрогравітаційного розділення зерна.....	19	
<i>Хімка С., Гошко М., Дробот І., Сиротюк В.</i> Методика і результати експериментальних досліджень енергоощадного вібраційного дозатора сипких кормів	26	
<i>Семен Я., Кузенко Л., Семен О.</i> Дослідження кінематики ланцюгово-плунжерного садильного апарата зубків часнику	35	
Розділ 3		
ЕНЕРГЕТИКА АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ		
<i>Боярчук В., Коробка С., Бабич М., Кригуль Р.</i> Методика дослідження тривалості сушіння фруктів у геліосушарці	43	
<i>Syrotiuk V., Syrotiuk S., Ptashnyk V.</i> Energy supply for the processes of greenhouse business with application of renewable sources of energy.....	56	
Розділ 4		
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ		
<i>Видмиш А., Штуць А.</i> Поліпшення характеристик перетворювача електропривода в перехідних режимах.....	61	
<i>Левонюк В.</i> Математичне моделювання перехідних електромагнітних процесів у мостовій системі випрямлення трифазного змінного струму на основі варіаційних підходів	67	
<i>Гречин Д., Дробот І., Хімка С., Гошко М.</i> Структурно-математичне моделювання різних способів пуску асинхронного двигуна	75	
<i>Гошко М.</i> Вплив конструкції пускорегулювальної апаратури сучасних світлодіодних ламп на їх робочі характеристики.....	84	
<i>Мірошник О.</i> Дослідження симетричних складових напруг у розподільній мережі 0,38/0,22 кВ	90	
<i>Возняк О., Колісник М.</i> Оптимізація імпульсного регулювання гальмування двигуна постійного струму	95	
<i>Мірошник О.</i> Порівняння енергоощадності систем електропостачання побутових споживачів	100	
<i>Янківський Д., Бризгалов В., Лягушкін А.</i> Джерела живлення автономного електротранспорту та ефективність їх застосування	106	
Розділ 5		
НАДІЙНІСТЬ І ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС МАШИН		
<i>Винар В., Головчук М., Василів Х., Гвоздецький В., Рацька Н., Рудковський С.</i> Трибокорозійна тривкість вуглецевих сталей з електродуговими покриттями з порошкових дротів 60X15P2ГС ТА 75X19P3С2.....	117	
Розділ 6		
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ. УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ ТА ПРОГРАМАМИ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ		
<i>Тригуба А., Тригуба І., Фтома О., Кондисюк І., Коваль Н.</i>		
Системний підхід до оцінювання ризиків несвоєчасного виконання робіт в інтегрованих проектах	123	
Розділ 7		
ІНЖЕНЕРІЯ БЕЗПЕКИ ДОВКІЛЛЯ ТА БЕЗПЕКИ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА		
<i>Войналович О., Тимочко В., Гнатюк О., Городецький І.</i> Визначення ризику травмування під час тракторних робіт на основі дефектоскопічного контролю	131	
<i>Миронюк О., Шевчук В.</i> Теоретичні дослідження зовнішнього шуму легкового автомобіля	137	

CONTENT

Chapter 1	
PHYSICAL, MECHANICAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF SOILS, AGRICULTURAL AND RAW MATERIALS	
<i>Krupych R., Kuzenko L., Krupych S., Levko S., Krupych O.</i> Study of the dimension indices of skeletal branches of a walnut tree.....	5
Chapter 2	
MACHINES AND WORK PROCESS OF AGRO INDUSTRIAL PRODUCTION	
<i>Pasika V., Koruniak P.</i> Kinematic analysis of lever mechanisms with an internal moving link	13
<i>Kovalyshyn S., Shvets O., Dadak V., Ptashnyk V.</i> Research of electro-gravity separation of grain	19
<i>Khimka S., Hoshko M., Drobot I., Sirotiuk V.</i> Methods and results of experimental research on energy saving fluid feeder	26
<i>Semen Ya., Kuzenko L., Semen O.</i> Research of kinematics of the chain and plunger planting device for garlic bulblet	35
Chapter 3	
POWER ENGINEERING OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX	
<i>Boiarchuk V., Korobka S., Babych M., Krygul R.</i> Method of research of fruit drying duration in the solar dryer.....	43
<i>Syrotiuk V., Syrotiuk S., Ptashnyk V.</i> Energy supply for the processes of greenhouse business with application of renewable sources of energy.....	56
Chapter 4	
ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS IN AGRO INDUSTRIAL PRODUCTION	
<i>Vidmysh A., Stuts A.</i> Improvement of characteristics of transmission converter in transition modes	61
<i>Levoniuk V.</i> Mathematical modeling of transient electromagnetic processes in the bridge system of transfer of a three-phase action current on the basis of variation approaches	67
<i>Hrechyn D., Drobot I., Khimka S., Hoshko M.</i> Structural-mathematical modeling of the different methods of initiating an induction motor	75
<i>Hoshko M.</i> Influence of construction of starting and controlling equipment of modern LED lamps on their operating characteristics	84
<i>Miroshnyk O.</i> Research of symmetric components of voltage in the distribution network 0,38/0,22 kV.....	90
<i>Vozniak A., Kolisnyk M.</i> Optimization of pulse controlling of engine stopping	95
<i>Miroshnyk O.</i> Comparison of the energy savings of household electricity supply systems.....	100
<i>Yankivskiy D., Bryzhalov V., Liahushkin A.</i> Power supply sources for autonomous electric vehicles and the effectiveness of their application.....	106
Chapter 5	
RELIABILITY AND TECHNICAL SERVICE OF MACHINES	
<i>Vynar V., Holovchuk M., Vasyliv C., Hvozdetzkyi V., Ratska N., Rudkovskiy Y.</i> Tribo-corrosion resistance of carbon steels with arc-sprayed coatings using powder electrodes 60X15P2ГC and 75X19P3C2	117
Chapter 6	
INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS. PROJECT MANAGEMENT IN AGRO ENGINEERING	
<i>Tryhuba A., Tryhuba I., Ftoma O., Kondysiuk I., Koval N.</i> System approach to evaluation of the risk of untimely implementation of work in the integrated projects	123
Chapter 7	
ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND AGRO INDUSTRIAL PRODUCTION SAFETY	
<i>Voinalovych O., Tymochko V., Hnatiuk O., Horodetskyi I.</i> Calculation of the risk of tractors operation on the basis of defectoscopic control data	131
<i>Myroniuk O., Shevchuk V.</i> Theoretical research of the car external noise	137

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
ЛЬВІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
АГРАРНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

Агроінженерні дослідження

№ 23

Редактор: Д. Б. Дончак
Коректори: Н. В. Скосарьова, М. Б. Опир
Технічний редактор: Н. І. Максимюк

Перелік наукових фахових видань України
Наказ МОН України № 241 від 09.03.2016 р., додаток 9

Львівський національний аграрний університет
80381, Львівська обл., Жовківський р-н, м. Дубляни,
вул. Володимира Великого, 1
Свідоцтво ДК № 1380 від 3.06.2003 р.

Підписано до друку 14.11.2019. Формат 60×84¹/₈.
Папір офс. Гарнітура «Гаймс». Друк на різнографі.
Обл.-вид. арк. 11,64. Ум. друк. арк. 18,50.
Наклад 500. Зам. 478.

Друк ФОП Гуменицький М. В.
81630, Львівська обл., Миколаївський р-н,
с. Гонятичі, вул. Польова, 10
Свідоцтво фізичної особи-підприємця № 083613 від 18.08.2008 р.