

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ВІСНИК

**КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ**

№ 4 (136), 2019

Частина 2 (серія «Технічні науки»)

DOI:10.30857/1813-6796.2019.4

Наукове фахове видання

Періодичність виходу: 6 разів на рік

Дата заснування: грудень 1999 р.

Київ 2019

Засновником журналу «ВІСНИК Київського національного університету технологій та дизайну» є

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Науковий фаховий журнал є правонаступником видання «Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности», який видавався з березня 1958 року у Київському технологічному інституті легкої промисловості (СРСР)

№4 (136), 2019

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації: серія KB №19330–9130 ПР від 08.08.2012 р.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК № 993 від 24.07.2002 р.

Журнал входить до переліку наукових фахових видань України. Наказ МОН України від 18.12.2018 № 1412 (додаток 10, рішення щодо подовження) – фаховість із технічних наук (категорія Б).

ISSN 1813-6796 print
ISSN 2617-9105 online

Журнал зареєстровано в Міжнародному центрі періодичних видань (ISSN International Centre, Париж, Франція)

Журнал реферується та індексується у наступних міжнародних базах даних: Ulrich's Periodicals Directory, EBSCOhost, WorldCat, РИНЦ, Index Copernicus, Research Bible, SJIF, PBN, JIF, OAJI, InfoBase Index, ISI, UIF, CiteFactor, Google Scholar, Crossref

Засновник і видавець:

Київський національний університет технологій та дизайну
Україна, 01011, м. Київ, вул. Немировича-Данченка, 2

Головний редактор:

Грищенко І. М., д.е.н., професор, академік НАПН України

Заступник

головного редактора:

Злотенко Б. М., д.т.н., професор

Відповідальний секретар:

Василенко В. М., к.т.н.

Тематична спрямованість журналу «Вісник КНУТД»: Мехатронні системи. Ресурсозбереження та енергоефективність. Матеріалознавство індустрії моди, технологій виробництва текстилю, одягу та взуття. Хімічні та біофармацевтичні технології

Видання орієнтоване на науковців, викладачів, аспірантів, студентів, а також науково-практичних працівників і фахівців відповідних галузей промисловості.

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

01011, м. Київ, вул. Немировича-Данченка, 2, корп. 1, к. 1-0252

тел./факс: +38 (044) 256-29-86

e-mail: vistnuk@knutd.edu.ua

<http://vistnyk.knutd.edu.ua/>

Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету технологій та дизайну, протокол № 2 від 25.09.2019 р.

Матеріали друкуються мовою оригіналу. Відповідальність за переклад, достовірність фактів, цитат, власних імен, географічних назв, назв підприємств, організацій, установ та іншої інформації несуть автори статей. Передруки та переклади статей дозволяються лише за згодою автора (-ів) та редакції.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

BULLETIN

**of the KYIV NATIONAL UNIVERSITY
of TECHNOLOGIES and DESIGN**

**Issue 4 (136), 2019 Part 2.
Technical Science Series**

DOI:10.30857/1813-6796.2019.4

Scientific Specialized Edition

Issued: 6 times a year

Founded: December, 1999

Kyiv 2019

The owner of «BULLETIN of the Kyiv National University of Technologies and Design» is

KYIV NATIONAL UNIVERSITY OF TECHNOLOGIES AND DESIGN

This Scientific Specialized Journal is the successor of the edition «Proceedings of Higher educational establishments. Technology of the light industry», which was published by Kiev Technological Institute of Light Industry from March, 1958 (USSR)

№4 (136), 2019 The state registration of print media is KB № 19330-9130 ПП, originating date 08.08.2012

License for publishing activity is ДК № 993, originating date 24.07.2002

The journal is listed & reregistered in Higher Attestation Commission of Ukraine: № 1412, originating date 18.12.2018. Fields: Technical Science.

ISSN 1813-6796 print
ISSN 2617-9105 online

The journal is registered in ISSN International Centre, Paris.

The journal is abstracted and indexed by Ulrich's Periodicals Directory, EBSCOhost, WorldCat, РИИЦ, Index Copernicus, Research Bible, SJIF, PBN, JIF, OAJI, InfoBase Index, ISI, UIF, CiteFactor, Google Scholar, Crossref

Owner and Publisher:

Kyiv National University of Technologies and Design
Ukraine, 01011, Kyiv, 2, Nemyrovych-Danchenka, Str.

Editor-in- Chief:

Ivan M. Gryshchenko - Dr., professor, Member of NAPS of Ukraine

Deputy Editor:

Borys M. Zlotenko - Dr., professor

Executive secretary:

Viktoria M. Vasylenko - PhD

Scientific fields: Mechatronic systems. Energy Efficiency and Resource-saving Technologies. Material science in the textile, clothing and footwear manufacturing industries. Chemical and biopharmaceutical technologies

The journal is aimed at a wide range of researchers, professors, students, and graduate students and to bring the results of scientific research carried out under a variety of intellectual traditions and organizations of procedures to the attention of a specialized readership.

EDITORIAL OFFICE:

01011, Ukraine, Kyiv, 2, Nemyrovych-Danchenka, Str., office 1-252

Tel./fax: +38 (044) 256-29-86

e-mail: vistnuk@knutd.edu.ua

<http://vistnyk.knutd.edu.ua/>

Recommendations from Science Council of Kyiv National University of Technologies and Design, Protocol № 2, originating date 25.09.2019.

Articles are published in the original language. The authors are responsible for the translation, authenticity of facts, quotations, proper names, geographic names, names of enterprises and other information.

The Editorial Office's and author's consent is needed prior to republishing or translating the articles.

ЗМІСТ

МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ. РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

1. **ШВЕДЧИКОВА І. О., РОМАНЧЕНКО Ю. А., МЕЛКОНОВА І. В.**
Удосконалення пластинчастої матриці поліградієнтного електромагнітного сепаратора 9
2. **ШАВЬОЛКІН О. О., СТАНОВСЬКИЙ Є. Ю., ПІДГАЙНИЙ М. О.**
Моделювання комбінованої системи електроживлення локального об'єкту з багатофункціональним перетворювальним агрегатом фотоелектричної батареї 20
3. **ЗЛОТЕНКО Б. М., СТАЦЕНКО Д. В.** Комп'ютерна енергоефективна система керування опаленням та гарячим водопостачанням будівель 34
4. **БУРМІСТЕНКОВ О. П., БІЛА Т. Я., СТАЦЕНКО В. В.** Дослідження енергоефективності обладнання для змішування сипких матеріалів 42
5. **СМОЛЯНИНОВ В. Г., СУХОПАРА О. М.** Енергоефективне керування лінійним кроковим пристроєм 49
6. **ЗАЛЮБОВСЬКИЙ М. Г., ПАНАСЮК І. В., МАЛИШЕВ В. В.** Визначення кутової швидкості ведучого валу машини для обробки деталей: енергетичний підхід 57
7. **ДЕМШОНКОВА С. А., ДЕМШОНКОВ Я. В., КУЛІК Т. І.** Функціональна діагностика параметрів трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором 66
8. **PAVLENKO V., VOLIANYK O.** Investigation of recuperator efficiency using in residential premises 77
9. **ДЕШКО В. І., СУХОДУБ І. О., СЕРДЕЧНИЙ П. Ю.** Використання енергетичного моделювання будівель при розробці проектів з підвищення енергоефективності 86
10. **ШЕВЧЕНКО О. М., ШОВКАЛЮК М. М.** Енергоефективний кампус КПІ: інструменти та методи досліджень 97

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ІНДУСТРІЇ МОДИ, ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ТЕКСТИЛЮ, ОДЯГУ ТА ВЗУТТЯ

11. **АРАБУЛІ С. І., АРАБУЛІ А. Т., ОТОТЮК С. С., КЛОЧКО В. В., ЧЕРЕПЕНКО Д. Ю.** Оцінка показників комфортності білизняних трикотажних полотен для занять спортом 106

УДК 621.318

¹ШВЕДЧИКОВА І. О., ²РОМАНЧЕНКО Ю. А.,

²МЕЛКОНОВА І. В.

¹Київський національний університет технологій та дизайну

²Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

УДОСКОНАЛЕННЯ ПЛАСТИНЧАСТОЇ МАТРИЦІ ПОЛІГРАДІЄНТНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА

Мета. Конструктивне удосконалення пластинчастої матриці поліградієнтного електромагнітного сепаратора, дослідження розподілу магнітного поля в робочій зоні матриці та визначення експериментальним шляхом ефективності роботи сепаратора.

Методика. При проведенні аналізу розподілу магнітного поля в робочій зоні матриці електромагнітного сепаратора використаний метод скінченних елементів, реалізований в модулі Magnet програмного комплексу Infolytica. Розподіл магнітного поля в системі, що містить в якості джерела магнітного поля котушку зі струмом, здійснений в тривимірній постановці. Для оцінювання ефективності вилучення феромагнітних включень із сипкого середовища застосований фізичний експеримент.

Результати. Запропонована удосконалена конструкція електромагнітного сепаратора, на яку отримано охоронний документ. Показано, що удосконалена конструкція забезпечує більш рівномірний розподіл локальних зон високої інтенсивності та неоднорідності магнітного поля в робочому об'ємі матриці сепаратора у порівнянні з базовою конструкцією. За результатами чисельно-польового аналізу розподілу магнітного поля методом скінченних елементів встановлено, що за рахунок конструктивного удосконалення матриці збільшилось максимальне значення магнітної індукції в робочих міжполюсних зазорах та підвищилась ступінь неоднорідності магнітного поля. Результати фізичного експерименту показали, що удосконалена конструкція сепаратора забезпечує підвищення ефективності вилучення металевих включень в порівнянні з базовою конструкцією, передусім, при невисокій концентрації металевих домішок у пробі сипкого матеріалу.

Наукова новизна. Отримали подальший розвиток чисельно-польові розрахунки розподілу магнітного поля в магнітопроводі та робочій зоні електромагнітного сепаратора, що дозволило обґрунтувати переваги удосконаленої конструкції сепаратора у порівнянні з базовим варіантом.

Практична значимість. Запропонована удосконалена конструкція матриці поліградієнтного електромагнітного сепаратора, призначеного для підвищення ефективності вилучення слабомагнітних та дрібних феромагнітних включень із сипких середовищ в харчовій, фармацевтичній та інших суміжних галузях промисловості.

Ключові слова: електромагнітний сепаратор, поліградієнтна матриця, магнітна індукція, ефективність вилучення феромагнітних включень.

Вступ. Найбільш ефективною технологією, яка спроможна відокремлювати дрібнодисперсні феромагнітні частинки розміром від 0,005 мм до 1мм, є поліградієнтна магнітна сепарація [1]. У робочих зонах пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації розміщуються матриці з дискретним поліградієнтним середовищем із заданими електромагнітними властивостями і геометричними параметрами елементарних осередків, що складаються з феромагнітних тіл (наприклад, загострених пластин, куль, циліндрів, стрижнів, сталеві вати і т.д.), за рахунок яких відбувається зміна первинного магнітного поля, що підвищує градієнт його напруженості (індукції), і, як наслідок, надійність вилучення дрібнодисперсних феромагнітних часток з матеріалу.

Більшість існуючих пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації призначена для очищення рідинних середовищ (пульпи) або запиленних газів [2, 3]. У той самий час у зв'язку зі зростанням вимог до якості продукції проблема вилучення дрібнодисперсних феромагнітних включень, які виникають в процесі зносу обладнання, є актуальною й для сипких матеріалів: борошна, круп, цукру, крохмалю, комбікорму, керамічної та фармацевтичної сировини тощо. Стандартами встановлені гранично допустимі норми наявності металодомішок у харчових продуктах, наприклад, в борошні – не більше 3 мг/кг сухої речовини, в комбікормі – не більше 20-30 мг/кг [4].

В сучасних умовах для очищення сипких матеріалів від дрібнодисперсних феромагнітних включень знайшли застосування переважно відкриті багатополюсні системи магнітних сепараторів, які є недостатньо ефективними при видаленні феромагнітних домішок розміром до 1 мм [5, 6]. Тому актуальним завданням є вдосконалення пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації для підвищення ефективності вилучення феромагнітних включень із сипких середовищ.

Постановка завдання. У роботі ставиться завдання щодо конструктивного удосконалення пластинчастої матриці поліградієнтного електромагнітного сепаратора базової конструкції, розробленого емпіричним шляхом. Для обґрунтування переваг удосконаленої конструкції перед її базовим варіантом необхідно провести теоретичні розрахунки розподілу магнітного поля в робочій зоні матриці та визначити ефективність роботи сепаратора.

Результати дослідження. Для забезпечення більш рівномірного розподілу локальних зон високої інтенсивності та підвищення неоднорідності магнітного поля в робочому об'ємі матриці електромагнітного сепаратора запропонована його удосконалена конструкція [7]. Електромагнітний сепаратор удосконаленої конструкції (рис. 1) містить нерухому напівзамкнуту електромагнітну систему, що включає в себе два циліндричних осердя 1, закріплені на осердях намагнічуючі котушки 2, полюса 3, виконані у вигляді пластин зі скошеними кутами і прикріплені до торцевих частин осердь 1, матрицю, встановлену з можливістю зворотно-поступального руху у вертикальній площині в зазорі між полюсами 3 і виконану у вигляді короба прямокутного перетину без дна так, що дві протилежні стінки 4 матриці, паралельні полюсам 3, виконані з феромагнітного матеріалу, а дві інші стінки 5 матриці – з немагнітного, при цьому до феромагнітних стінок 4 матриці зсередини закріплено кілька рядів похило встановлених паралельних феромагнітних пластин 6, 7 з трикутними виступами, зверненими всередину матриці. На відміну від базової конструкції електромагнітного сепаратора суміжні ряди паралельних феромагнітних пластин 6 і 7 встановлено із чергуванням трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках.

У робочому режимі намагнічуючі котушки 2 електромагнітного сепаратора підключаються до мережі постійного струму. Під дією сили, що намагнічує, в просторі між полюсами 3 створюється магнітне поле. При цьому полюса-пластини 3 набувають різну полярність, завдяки тому, що обмотки котушок 2 з'єднані зустрічно і магнітні потоки в осердях 1 мають однаковий напрямок. Немагнітний сипучий матеріал разом зі слабомагнітними або дрібнодисперсними феромагнітними частинками подається безпосередньо у середину матриці на похилі паралельні феромагнітні пластини 6, 7.

Наявність односторонніх трикутних виступів і впадин у пластин 6, 7 дозволяє створити в робочому зазорі, утвореному пластинами, магнітне поле високої неоднорідності. Особливо великі значення градієнтів напруженості магнітного поля будуть мати місце у країв трикутних виступів, де створюються електромагнітні сили, достатні для вилучення дрібнодисперсних феромагнітних або слабомагнітних часток. Чергування в суміжних рядах паралельних феромагнітних пластин 6 і 7 трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках створює умови для рівномірного розподілу локальних зон з великою неоднорідністю поля в робочому об'ємі матриці, що забезпечує істотне підвищення надійності вилучення слабомагнітних або дрібнодисперсних феромагнітних тіл.

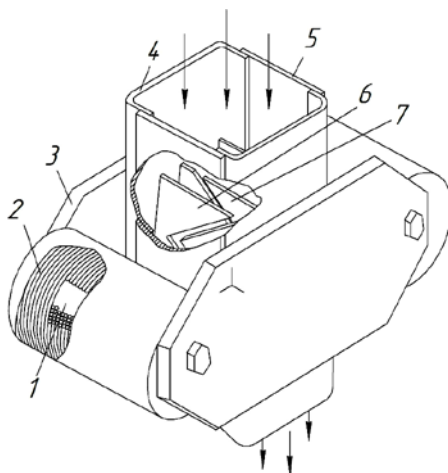


Рис. 1. Електромагнітний сепаратор удосконаленої конструкції

Сипкий матеріал подається на похилі пластини 6, 7 в підвішеному стані. Частинки матеріалу, вдаряючись з краївками пластин, постійно змінюють напрямки свого руху, що сприяє кращому перемішуванню матеріалу. Зважений стан і перемішування матеріалу при проходженні через матрицю полегшують видалення домішок з немагнітного матеріалу. При цьому похилі пластини 6 розташовані під таким кутом, що матеріал, що підлягає сепарації, проходить через кілька робочих зазорів, утворених пластинами 6, що збільшує час знаходження сипучого матеріалу в зоні високоградієнтного поля і сприяє більш надійному витяганню магнітних частинок.

В робочому режимі немагнітна фракція сипучого матеріалу вільно проходить через матрицю, а слабомагнітні або дрібнодисперсні феромагнітні частинки під дією сил магнітного поля "налипають" до феромагнітних пластин 6, накопичуючись на них. Для періодичного розвантаження витягнутих і "залипших" до феромагнітних пластин 6 слабомагнітних або дрібнодисперсних феромагнітних частинок котушки 2 відключаються від мережі. При цьому магнітне поле різко послаблюється і матриця під дією власної ваги переміщується вертикально вниз. У результаті відбувається досить ефективно відпадиння витягнутих частинок.

Таким чином, в удосконаленій конструкції електромагнітного сепаратора суміжні ряди паралельних феромагнітних пластин матриці встановлено із чергуванням трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках, що забезпечує більш рівномірний розподіл

локальних зон високої інтенсивності та неоднорідності магнітного поля в робочому об'ємі матриці сепаратора у порівнянні з базовою конструкцією та створює умови для підвищення ефективності вилучення слабomagнітних та дрібних феромагнітних включень крупністю менше 1 мм.

З точки зору структурно-системного підходу [8, 9], удосконалена конструкція електромагнітного сепаратора разом з його базовим варіантом відносяться до ізомерних композицій, які відрізняються просторовим розміщенням суміжних рядів паралельних феромагнітних пластин.

Розподіл магнітного поля в системі, що містить в якості джерела магнітного поля котушку зі струмом, описується системою диференціальних рівнянь Максвелла, яка для векторного магнітного потенціалу A має вигляд [10]

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_0, \quad (1)$$

де μ_r – магнітна проникність матеріалу магнітопроводу, яка, в загальному випадку, є нелінійною функцією магнітної індукції; μ_0 – магнітна проникність вакууму, яка дорівнює $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; \mathbf{J}_0 – вектор щільності струму в перерізі котушки.

Для оцінювання переваг удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора перед базовою проведені дослідження розподілу магнітної індукції в робочій зоні матриці сепаратора. Для вирішення цього завдання був задіяний метод скінченних елементів, реалізований у тривимірній постановці в модулі Magnet програмного комплексу Infolytica [11]. Задавались щільність струму в обмотці – 2,1 А/мм² та конструктивні параметри магнітної системи, зокрема: робоча ширина матриці сепаратора – 180 мм, відстань між сусідніми виступами пластин – 100 мм, кут при вершині виступу пластини – 20°, робочий міжполюсний проміжок – 13,6 мм.

При дослідженні приймалося, що магнітопровід електромагнітної системи, включаючи пластини матриці, виготовлений зі магнітом'якої конструкційної сталі. Прийнято припущення про сталість відносної магнітної проникності μ_r матеріалу магнітопроводу ($\mu_r = 1000$). Для стінок матриці (позиція 4 на рис. 1) задавався немагнітний матеріал (алюміній). В якості граничних умов на зовнішніх границях розрахункової області використовувалася умова магнітної ізоляції $A=0$.

На рис. 2 представлена геометрична модель удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора. Конфігурація основної магнітної системи цього сепаратора така ж сама, як у базової конструкції, але в матриці суміжні ряди паралельних феромагнітних пластин розташовані із чергуванням трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках (рис. 2, б).

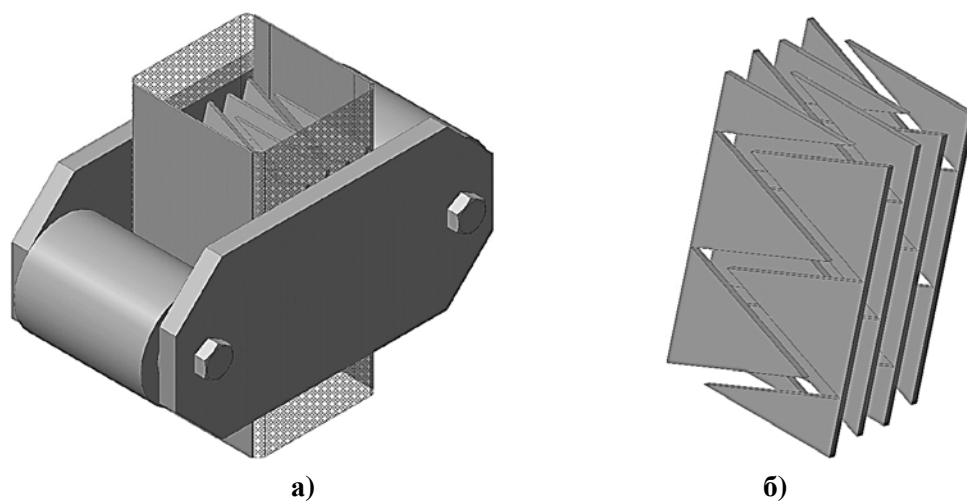


Рис. 2. Геометрична модель удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора:
а – загальний вигляд; б – пластини матриці

На рис. 3 представлені результати моделювання, отримані для удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора. За результатами моделювання був здійснений розрахунок розподілу магнітної індукції в матриці електромагнітного сепаратора в характерних точках 1-7, розташованих вздовж середньої характерної лінії робочого проміжку для внутрішнього ряду феромагнітних пластин. На рис. 4 ця лінія позначена стрілкою.

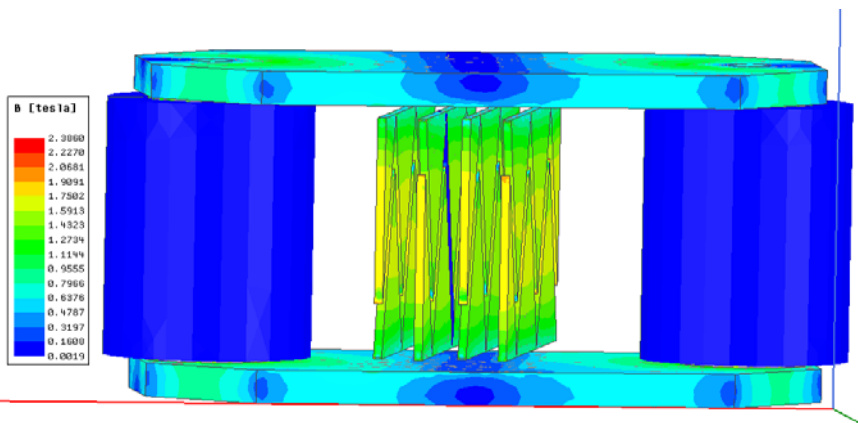


Рис. 3. Результати моделювання удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора

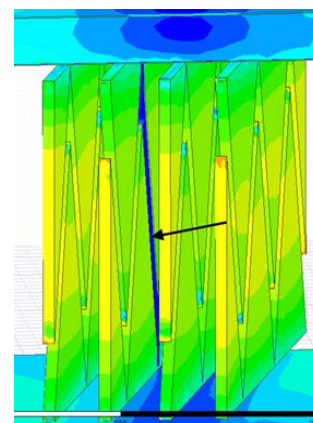


Рис. 4. Розташування характерної лінії

Результати розрахунку розподілу магнітної індукції B електромагнітного сепаратора удосконаленої конструкції в характерних точках 1-7 для внутрішнього ряду пластин показані на рис. 5. На рис. 5 також здійснено порівняння отриманих під час 3D-моделювання результатів з результатами експериментальних досліджень розподілу магнітної індукції для внутрішнього ряду пластин базової конструкції електромагнітного сепаратора.

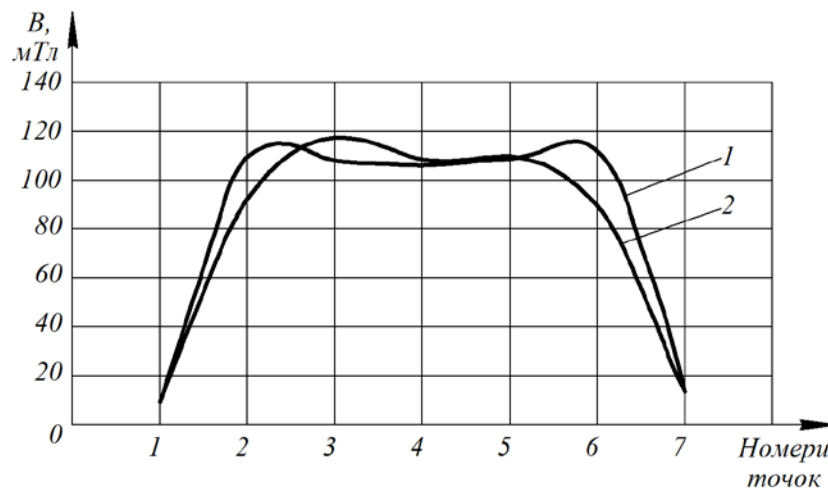


Рис. 5. Розподіл магнітної індукції в характерних точках:

1 – базовий варіант сепаратора; 2 – удосконалений варіант сепаратора

Максимальне значення магнітної індукції (табл. 1) склало, відповідно: для базової моделі – 108,6 мТл, для удосконаленої моделі - 117,7 мТл (відносна похибка – 8,3%). У той самий час, як свідчить рис. 5, ступінь неоднорідності поля в робочому проміжку вище для удосконаленої конструкції пристрою. Для базового варіанту локальний коефіцієнт k_i неоднорідності в точках 2-6 приймає майже однакове значення (1,33-1,36), що свідчить про однорідний характер магнітного поля, в той самий час для удосконаленої конструкції сепаратора коефіцієнт k_i змінюється у межах 1,15-1,55.

Визначення інтегрального показника K_i неоднорідності поля здійснювалось за формулою

$$K_i = (B_{\max} - B_{\min}) / (B_{\max} + B_{\min}), \quad (2)$$

де B_{\max} , B_{\min} – максимальне та мінімальне значення індукції магнітного поля із заданого діапазону, відповідно.

Розрахований за формулою (2) інтегральний показник неоднорідності поля для характерних точок 2-6 склав, відповідно: для базової моделі – 0,9%, для удосконаленої моделі – 14,9%.

Таблиця 1

Порівняння результатів експериментальних досліджень розподілу магнітної індукції для базової конструкції з результатами чисельних розрахунків для удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора

Номери характерних точок	Базова конструкція		Удосконалена конструкція		Відхилення за магнітною індукцією, %
	Магнітна індукція, мТл	Локальний коефіцієнт неоднорідності k_i , в.о.	Магнітна індукція, мТл	Локальний коефіцієнт неоднорідності k_i , в.о.	
1	2	3	4	5	6
1	9,1	0,11	10,4	0,137	+14,3

Продовження таблиці 1.

1	2	3	4	5	6
2	108,6	1,36	92,9	1,22	-16,7
3	108,6	1,36	117,7	1,55	+8,3
4	106,6	1,33	108,4	1,43	+1,7
5	108,6	1,36	108,6	1,433	0
6	108,6	1,36	87,1	1,15	-24,7
7	9,1	0,11	6,8	0,089	-33,8

Далі з застосуванням фізичної моделі (рис. 6) були проведені експериментальні дослідження з визначення ефективності роботи удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора та порівняння її з базовою. При цьому всі геометричні та електричні параметри моделі залишалися такими ж, як і для базової конструкції сепаратора (змінювалось тільки розташування паралельних феромагнітних пластин в суміжних рядах). Для визначення ефективності роботи електромагнітного сепаратора були використані проби борошна з різною вихідною концентрацією металевих домішок розміром від 0,01 до 5 мм. Вилучений метал зважували на аналітичних вагах та визначали його концентрацію. Експеримент проводився в умовах сталого температурного режиму.

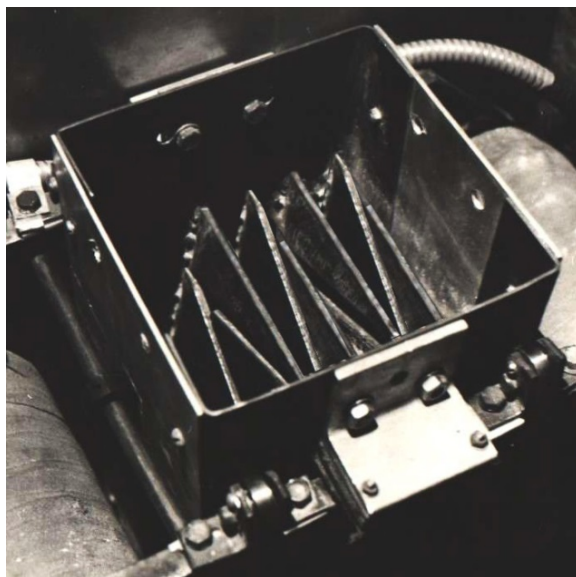


Рис. 6. Розташування пластин в матриці удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора

Результати експерименту наведені у табл. 2, в якій для порівняння також представлені результати з визначення ефективності базової конструкції електромагнітного сепаратора.

Таблиця 2

Результати експерименту з визначення ефективності
 електромагнітного сепаратора

Маса проби борошна	Загальна маса металевих включень	Маса металевих включень на 1 кг борошна	Вилучено металевих включень:			
			Базова конструкція		Удосконалена конструкція	
кг	г	г	г	%	г	%
6	60	10	54,32	90,54	54,16	90,27
6	30	5	28,66	95,53	27,8	92,7
6	6	1	5,61	93,5	5,72	95,3
6	3	0,5	2,79	93,0	2,85	95,0
6	0,09	0,015	0,079	87,28	0,085	94,4

Як свідчить табл. 2, і базова, і удосконалена конструкції електромагнітного сепаратора забезпечують достатньо високу ефективність вилучення феромагнітних включень (90,3-95,0)% при їх вихідній концентрації (1-10) г на 1 кг продукту. У той самий час при невисокій концентрації металевих домішок у пробі (менше 1 г на 1 кг продукту) більш високу ефективність вилучення металевих включень забезпечує удосконалена конструкція електромагнітного сепаратора.

Висновки. Шляхом проведення чисельно-польового аналізу розподілу магнітного поля в робочих міжполюсних зонах матриці з поліградієнтним середовищем на основі пластин у формі трикутних елементів встановлено, що удосконалена конструкція сепаратора відрізняється більш високим ступенем неоднорідності поля в робочому зазорі. Діапазон зміни локального коефіцієнту k_i неоднорідності поля для базового варіанту становить 1,33-1,36, що свідчить про однорідний характер магнітного поля, в той самий час для удосконаленої конструкції сепаратора коефіцієнт k_i змінюється у межах 1,15-1,55. Максимальне значення магнітної індукції для удосконаленої моделі склало 117,7 мТл, що на 8,3% вище, ніж у базового варіанту.

Виходячи з результатів фізичного експерименту, встановлено, що удосконалена конструкції електромагнітного сепаратора забезпечує достатньо високу ефективність вилучення феромагнітних включень (приблизно 90,3-95,0%) при їх вихідній концентрації 1-10 г на 1 кг продукту. При цьому ефективність вилучення слабوماгнітних та дрібних феромагнітних включень крупністю до 1 мм на 7% вище для удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора.

Література

1. Svoboda J. *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials* / J. Svoboda // Kluwer Academic Publishers, Boston. – 2004. – P. 99.
2. Wei Ge. *Magnetic matrices used in high gradient magnetic separation (HGMS): A review* / Ge. Wei, A. Encinas, E. Araujo, Sh. Song // *Results in Physics*. – 2017. – 7. – P.4278-4286.

References

1. Svoboda, J. (2004). *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
2. Ge, W., Encinas, A., Araujo, E., Song, Sh. (2017). *Magnetic matrices used in high gradient magnetic separation (HGMS): A review. Results in Physics*. 7, 278-4286.

3. Ren L. Magnetic field characteristics analysis of a single assembled magnetic medium using ANSYS software / L. Ren, Sh. Zeng, Y. Zhang // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2015. – 25. – P. 479–487.
4. Шевцов А.А. Применение редкоземельных магнитов для извлечения магнитных примесей из минеральных премиксов / А. А. Шевцов, И. Б. Мещеряков, Э. Б. Мещеряков // *Вестник ВГУИТ*. – 2012. – №2. – С. 30-32.
5. Пилов П. И. Сепарация ультрадисперсных слабомагнитных материалов в сверхсильных магнитных полях / П. И. Пилов, В. Ю. Шутов, Н. Г. Кабакова, Л. А. Шатова // *Збагачення корисних копалин*. – 2017. – Вип. 68(109). – С. 133-138.
6. Просвирин В. И. Особенности извлечения ферропримесей из сыпучих сельскохозяйственных материалов / В. И. Просвирин, Е. П. Мастюкин, И. О. Кузнецов, В. Б. Гулевский // *Науковий вісник ТДАТУ*. – 2011. – Вип. 1, Том 1. – С. 75-78.
7. Патент на корисну модель № 103156, Україна, ВОЗС 1/00 (2015.01). Електромагнітний сепаратор / Шведчикова І. О., Романченко Ю. А.; патентовласник: ЧНУ і. В. Даля; заявл. 05.05.15; опубл. 10.12.15, Бюл. № 23. – 5 с.
8. Шведчикова І. А. Исследование закономерностей структурообразования полиградиентных сред / И. А. Шведчикова, Ю. А. Романченко, И. А. Луценко // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – Т. 4, №7 (76). – С. 62 – 67.
9. Шинкаренко В. Ф. Структурная изомерия и ее моделирование в задачах генетического синтеза электромеханических структур / В. Ф. Шинкаренко, А. А. Августинович, М. А. Махновецкая, В. В. Лысак // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – № 1. – С. 33-36.
10. Подольцев А. Д. Многомасштабное моделирование в электротехнике: моногр. / А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – Киев : Институт электродинамики НАН Украины, 2011. – 239 с.
11. Infolytica is now part of Mentor, a Siemens Business [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступа : <https://www.mentor.com/products/mechanical/infolytica>.
3. Ren L., Zeng Sh., Zhang Y. (2015). Magnetic field characteristics analysis of a single assembled magnetic medium using ANSYS software. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25, 479–487.
4. Shevcov, A. A., Meshherjakov, I. B., Meshherjakov, Je. B. (2012). Primenenie redkozemel'nyh magnitov dlja izvlechenija magnitnyh primesej iz mineral'nyh premiksov [The use of rare earth magnets for extraction of magnetic impurities from mineral premixes]. *Vestnik VGUIIT – Messenger VGUIIT*, 2, 30-32. [in Russian].
5. Pilov, P.I., Shutov, V.Yu., Kabakova, N.G., Shatova, L.A. (2017). Separacija ul'tradispersnyh slabomagnitnyh materialov v sverhsil'nyh magnitnyh poljah [Separation of ultradispersed low magnetic materials in superstrong magnetic fields]. *Zbahachennia korysnykh kopalyn – Mineral processing*, 68(109), 133-138. [in Ukraine].
6. Prosvirin, V. I., Mastyukin, E. P., Kuznetsov, I. O., Gulevskiy, V. B. (2011). Separatsiya ul'tradispersnykh slabomagnitnykh materialov v sverksil'nykh magnitnykh polyakh [Extracting Features of ferroimpurities extraction from bulk agricultural materials] *Naukovyi visnyk TDAU – Scientific Herald TSATU*, 1, 75-78 [in Ukrainian].
7. Shvedchikova, I. O., Romanchenko, Yu. A., inventors (2015). *Elektromagnitnyi separator* [Electromagnetic separator]. Ukrainian patent, no. 103156, 10.12.15.
8. Shvedchikova I.A., Romanchenko Yu.A., Lucenko I.A. (2015). Issledovanie zakonornostej strukturoobrazovanija poligradientnyh sred [Research of regularities of structure formation of polygradient media]. *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij – Eastern-european journal of enterprise technologies*. 4, 7 (76), 62-67 [in Ukrainian].
9. Shinkarenko, V. F., Avgustinovich, A. A., Mahnoveckaja, M. A., Lysak, V. V. (2009). Strukturnaja izomerija i ee modelirovanie v zadachah geneticheskogo sinteza jelektromehanicheskikh struktur [Structural isomerism and its modeling in problems of genetic synthesis of electromechanical structures]. *Jelektrotehnika i jelektromehanika – Electrical engineering and electromechanics*, 1, 33-36 [in Ukrainian].
10. Podol'cev, A. D., Kucherjavaja, I. N. *Mnogomasshtabnoe modelirovanie v jelektrotehnike* [Multiscale modeling in electrical engineering]. (2011). Kiev : Institut jelektrodinamiki NAN Ukrainy [in Ukrainian].
11. Infolytica is now part of Mentor, a Siemens Business. Retrieved from: <https://www.mentor.com/products/mechanical/infolytica>.

SHVEDCHUKOVA IRYNA

ResearcherID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6503887672>

<http://www.researcherid.com/rid/O-2765-2018>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3005-7385>

Department of Energy Management and Applied Electronics,
Kyiv National University of Technologies & Design

ROMANCHENKO JULIA

ResearcherID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190438710>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6579-6474>

Department of Electrical Engineering,
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

MELKONOVA INNA

ResearcherID: https://www.researchgate.net/profile/Inna_Melkonova

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6173-1470>

Department of Electrical Engineering,
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПЛАСТИНЧАТОЙ МАТРИЦЫ ПОЛИГРАДИЕНТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА ¹ШВЕДЧИКОВА И. А., ²РОМАНЧЕНКО Ю. А., ²МЕЛКОНОВА И. В.

¹ Киевский национальный университет технологий и дизайна

² Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля

Цель. Конструктивное усовершенствование пластинчатой матрицы полиградиентного электромагнитного сепаратора, исследование распределения магнитного поля в рабочей зоне матрицы и определение экспериментальным путем эффективности работы сепаратора.

Методика. При проведении анализа распределения магнитного поля в рабочей зоне матрицы электромагнитного сепаратора применялся метод конечных элементов, реализованный в модуле Magnet программного комплекса Infolytica. Распределение магнитного поля в системе, которая содержит в качестве источника магнитного поля катушку с током, осуществлено в трехмерной постановке. Для оценки эффективности извлечения ферромагнитных включений из сыпучих сред применен физический эксперимент.

Результаты. Предложена усовершенствованная конструкция электромагнитного сепаратора, на которую получено охранное свидетельство. Показано, что усовершенствованная конструкция обеспечивает более равномерное распределение локальных зон высокой интенсивности и неоднородности магнитного поля в рабочем объеме матрицы сепаратора по сравнению с базовой конструкцией. По результатам численно-полевого анализа распределения магнитного поля методом конечных элементов установлено, что за счет конструктивного усовершенствования матрицы увеличилось максимальное значение магнитной индукции в рабочих межполюсных зазорах и повысилась степень неоднородности магнитного поля. Результаты физического эксперимента показали, что усовершенствованная конструкция сепаратора обеспечивает повышение эффективности извлечения металлических включений по сравнению с базовой конструкцией, прежде всего, при невысокой концентрации металлических примесей в пробе сыпучего материала.

Научная новизна. Получили дальнейшее развитие численно-полевые расчеты распределения магнитного поля в магнитопроводе и рабочей зоне электромагнитного сепаратора, что позволило обосновать преимущества усовершенствованной конструкции сепаратора по сравнению с базовым вариантом.

Практическая значимость. Предложена усовершенствованная конструкция матрицы полиградиентного электромагнитного сепаратора, предназначенного для повышения эффективности извлечения слабомагнитных и мелких ферромагнитных включений из сыпучих сред в пищевой, фармацевтической и других смежных отраслях промышленности.

Ключевые слова: электромагнитный сепаратор, полиградиентная матрица, магнитная индукция, эффективность извлечения ферромагнитных включений.

IMPROVEMENT OF LAMINATED MATRICES OF
POLYGRADIENT ELECTROMAGNETIC SEPARATOR

¹SHVEDCHUKOVA I. O., ²ROMANCHENKO J. A., ²MELKONOVA I.V.

¹ Kyiv National University of Technologies and Design

² Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

Purpose. Constructional improvement of lamellar matrix of polygradient electromagnetic separator, research of magnetic field distribution in working area of matrix and experimental determination of separator efficiency.

Methodology. The finite element method implemented in module Magnet of Infolytica software package for analysis of magnetic field distribution in working area of matrix of electromagnetic separator was used. The distribution of magnetic field in a system that contains a current coil as a source of magnetic field is carried out in a three-dimensional formulation. The physical experiment for evaluation of extraction efficiency of ferromagnetic inclusions from loose medium was applied.

Findings. An improved design of electromagnetic separator is proposed, for which a security document is received. It is shown that improved design provides a more uniform distribution of local areas of high intensity and heterogeneity of magnetic field in working volume of separator matrix in comparison with basic design. According to results of numerical-field analysis of magnetic field distribution by application of finite element method, it was set that due to constructional improvement of matrix the maximum value of magnetic induction in working interpolar gaps and inhomogeneity degree of magnetic field increased. The results of physical experiment showed that improved design of separator provides an increase of extraction efficiency of metal inclusions in comparison with basic design, first of all, at a low concentration of metal impurities in sample of bulk material.

Originality. For improved design of electromagnetic separator, the distribution of magnetic field in magnetic circuit and working area of device is obtained, which made it possible to substantiate its advantages compared to basic version.

Practical value. The numerical-field calculations of magnetic field distribution in magnetic circuit and working area of electromagnetic separator received further development, which made it possible to substantiate advantages of improved design of separator compared to basic version.

Key words: electromagnetic separator, polygradient matrix, magnetic induction, extraction efficiency of ferromagnetic inclusions.

УДК 621.314.26

ШАВЬОЛКІН О. О., СТАНОВСЬКИЙ Є. Ю.,
ПІДГАЙНИЙ М. О.

Київський національний університет технологій та дизайну

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ З
БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИМ
АГРЕГАТОМ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ БАТАРЕЇ**

Мета. Розробка деталізованої математичної моделі системи «мережа – багатофункціональний перетворювальний агрегат з фотоелектричною батареєю – навантаження», що дозволить здійснити комплексне дослідження процесів в системі з оцінкою ефективності агрегату.

Методика. Синтез структури моделі та системи керування агрегатом на базі аналізу процесів у електричних колах з використанням комп'ютерного моделювання.

Результати. Залежності для апроксимації вольт-амперної характеристики фотоелектричної батареї. Запропоновано використання в якості нелінійного реактора стандартної моделі трансформатора з насиченням магнітного кола. Модель для визначення втрат потужності в напівпровідникових ключах за миттєвими значеннями струмів і напруги та їх каталожними даними.

Наукова новизна. Удосконалено математичну модель фотоелектричної батареї за паспортними даними з введенням залежності напруги холостого ходу від інтенсивності сонячного випромінювання. Удосконалено структуру системи керування з внутрішнім контуром регулювання струму та перемиканням зовнішніх регуляторів згідно режиму роботи: за роботи з мережею в «денному» режимі це регулятор напруги фотоелектричної батареї, в «нічному» - регулятор вхідної напруги інвертору; в автономному режимі - регулятор напруги навантаження. Обґрунтовано зміну налаштування контуру регулювання струму і частоти модуляції в автономному режимі, що виключає зростання втрат потужності в ключах.

Практичне значення. Отримані рішення є основою для проектування і аналізу показників багатофункціональних перетворювальних агрегатів для систем з поновлювальними джерелами електроенергії з покращеною енергоефективністю.

Ключові слова: багатофункціональний перетворювальний агрегат, ШІМ, втрати потужності в ключах, фотоелектрична батарея, перемикання режимів роботи агрегату, коефіцієнт гармонік, моделювання.

Вступ. Зараз широкого розповсюдження для локальних об'єктів промислового та побутового призначення набувають комбіновані системи електроживлення (КСЕ) з фотоелектричними сонячними батареями (СБ) та підключенням до розподільчої мережі змінного струму (РМ). За цього навантаження локального об'єкту отримує живлення від двох і більше джерел енергії. Такі системи мають достатньо дорогий перетворювальний агрегат з мережевим інвертором, який з урахуванням тривалості денного часу і кліматичних умов здебільшого простоє або недовикористовується за потужністю. Підвищення ефективності використання обладнання таких систем пов'язують з застосуванням багатофункціональних перетворювальних агрегатів (БПА) з цілодобовим режимом роботи [1, 2, 3], що суміщають функцію силового активного фільтру (САФ) підтримуючи близький до одиниці коефіцієнт потужності в точці підключення до РМ, автономний режим у разі відключення РМ та інше. Розглядається використання таких рішень для різних потужностей, топологій схем, умов експлуатації з урахуванням властивостей локальних об'єктів, що часто

мають значну віддаленість від трансформаторних підстанцій і в реальних умовах значні коливання напруги. Слід враховувати, що для об'єктів з розподіленими джерелами енергії діють жорсткі вимоги щодо якості струму в точці підключення до мережі [5, 6].

За цього на етапі розробки та проектування таких рішень ефективним інструментом є математичне моделювання на ПК з використанням широко апробованих програмних пакетів, зокрема, Matlab (SimPower System). Їх бібліотеки постійно розширюються з додавання моделей елементів електричних кіл, силової електроніки, математичних функцій, вимірювання різноманітних параметрів тощо.

При удосконаленні існуючих і розробці нових рішень БПА виникають питання щодо оцінювання їх працездатності за певних умов, визначення показників ефективності, зокрема, ККД. За цього важливим є врахування властивостей СБ, можливостей використання в мережевому автономному інверторі напруги (АІН) нелінійного вихідного реактору, індуктивність якого залежить від струму. Це ж стосується і перемикачів режимів роботи ПА. Разом з тим, відсутні моделі для визначення втрат потужності в ключах, нелінійного реактору. Моделі СБ [7, 8, 9] будуються на підставі еквівалентних схем фотоелемента. За цього ряд параметрів, які використовуються, відсутні в каталожних даних, що потребує додаткових розрахунків [8, 9]. В [10, 11] подано математичні моделі, в яких використовуються лише каталожні значення напруги та струму для режиму холостого ходу, максимальної потужності та короткого замикання. Моделі базуються на тому, що значення напруги холостого ходу не залежить від інтенсивності сонячного випромінювання. Але це не завжди є коректним і може призвести до значної похибки.

Отже питання математичного моделювання КСЕ є недостатньо вивченим і потребує подальшої доробки і удосконалення.

Мета роботи. Розробка деталізованої математичної моделі системи «мережа – БПА з СБ – навантаження», що дозволить здійснити комплексне дослідження процесів в системі з оцінкою ефективності перетворювального агрегату.

Завдання, що підлягають вирішенню:

- розробка та удосконалення моделей елементів системи;
- розробка відповідної структури системи керування БПА;
- розробка загальної деталізованої моделі системи;
- дослідження процесів і показників роботи БПА у різних режимах роботи.

Результати роботи. Розглянемо принципи реалізації математичної моделі системи «мережа – БПА з СБ – навантаження» з використанням однофазного БПА з прямим підключенням СБ до АІН за відсутності акумуляторної батареї (АКБ). Цей варіант порівняно з використанням проміжного перетворювача в ланці постійного струму є більш складним при аналізі процесів у схемі, оскільки напруга СБ U_{CB} і, відповідно, напруга на вході АІН U суттєво змінюється із змінюванням температури СБ, а в автономному режимі зі змінюванням навантаження. За цього БПА повинен забезпечувати: роботу паралельно з РМ за наявності та відсутності генерації енергії СБ («денний» та «нічний» режими); автономний режим роботи (АРР) за наявності генерації енергії СБ, перемикачів режимів роботи і заряджання конденсатора на вході АІН.

Загальна структура моделі системи (рис.1) містить: РМ у вигляді джерела змінної напруги з активним і індуктивним опорами мережі ($R_M, X_L = \omega L_M$); мережевий мостовий АІН з

вихідним реактором; навантаження (активно-індуктивне і нелінійне – випрямляч з вихідним ємнісним фільтром); конденсатор C_f з невеликим резистором R_f в спільній точці підключення АІН і навантаження до мережі для придушення модуляційних складових струму АІН; сонячну батарею СБ; блок визначення втрат потужності в ключах АІН (БВВ); систему керування СК.

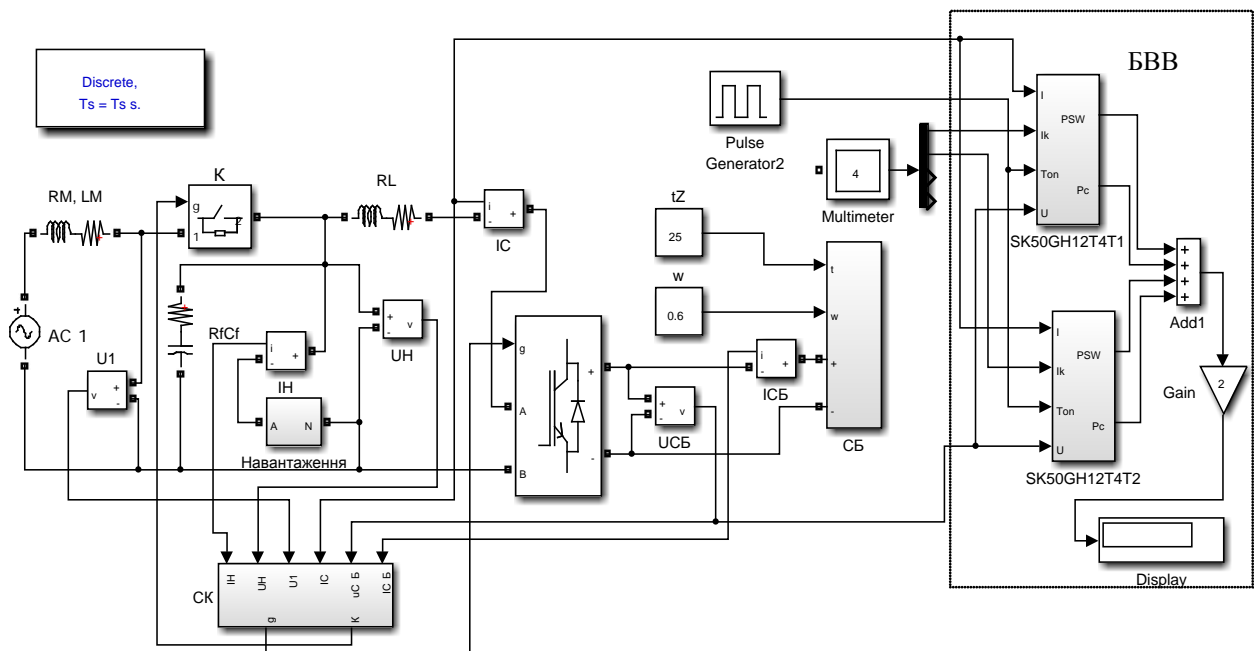


Рис. 1. Загальна структура моделі системи

Для відключення БПА від мережі передбачено контактор К. Для вимірювання струмів та напруги використовуються датчики струму та напруги.

Загальна структура моделі системи керування (рис.2) містить контур регулювання струму (КРС), блок завдання струму (БЗС), блок керування (БК), три пропорційно-інтегральні регулятори напруги (РН1÷РН3) та перемикачі S1, S2. Для спрощення в моделі відсутній контролер максимальної потужності МРРТ і завдання напруги СБ задається «вручну» як константа. Також відсутній блок фазового підстроювання частоти (ФАПЧ).

напруги навантаження u_H . Умовою перемикання в АРР є достатня для нормального функціонування навантаження спроможність СБ за потужністю ($P_{СБМАХ}$) у поточних умовах. За цього відбирається потужність відповідно навантаженню об'єкта. Якщо значення $P_{СБМАХ}$ буде недостатнім, напруга u_H зменшується у припустимих межах (до 10%), якщо і це не вирішує питання, частину навантаження слід вимкнути. Така можливість забезпечується у разі використання «інтелектуальних» систем керування енергоспоживанням локального об'єкта. Це є окремою задачею.

В АРР СБ працює на ділянці вольт-амперної характеристики (ВАХ) між режимом холостого ходу і максимальної потужності за відповідного зростання напруги (до 24%).

Напруга на вихідному реакторі АІН $u_L = L \frac{di_C}{dt} = u_C - u_H$ (i_C – вихідний струм АІН, u_C –

вихідна напруга АІН, що за однополярної ШІМ приймає значення $U, 0, -U$). Отже зростання U призводить к збільшенню швидкості змінювання струму і порушенню умови [3]

$\frac{di_C}{dt} \leq \frac{du_{TP}}{dt}$ (u_{TP} – модулююча напруга). Як наслідок, маємо додаткові (зайві) перемикання

ключів АІН. За відключення напруги РМ напруга навантаження не є ідеально згладженою внаслідок цього в завданні струму АІН i^*_C з'являються високочастотні пульсації за відповідного збільшення швидкості змінювання струму АІН. За підвищення напруги ключів і кількості їх перемикань отримуємо зростання втрат потужності на перемикання ключів АІН. Для виключення цього слід зменшити коефіцієнт k передавання пропорційної ланки [3, 4] в КРС. У разі збереження втрат потужності в ключах відносно режиму роботи АІН паралельно з мережею, коли БПА перетворює максимальне значення потужності СБ значення ККД БПА буде меншим. Зменшення втрат перемикання ключів можливо шляхом зниження частоти модуляції f_M в межах підтримання значення $THDu_H \leq 8\%$.

Модель СБ. ВАХ сонячної панелі (СП) типу LDK-245-20 [12] для різних значень інтенсивності сонячного випромінювання наведені на рис.3. Такі характеристики поряд зі значеннями напруги і струму в режимі холостого ходу (U_X), максимальної потужності (U_M, I_M), короткого замикання (I_K) для температури 25°C і інтенсивності сонячного випромінювання 1000 Вт/м² надаються виготівником. Визначимо їх як паспортні ($U_{XP}, U_{MP}, I_{KP}, I_{MP}$). Аналіз існуючих методів апроксимації характеристик СП [8÷11] показує, що достатньо зручним для використання є рівняння ВАХ, яке при заданій температурі і інтенсивності сонячного випромінювання має вигляд [10, 11]

$$I = I_K \left[1 - \left(1 - \frac{I_M}{I_K} \right)^{\frac{U - U_X}{U_M - U_X}} \right]. \quad (1)$$

Відповідно паспортним значенням напруги і струму отримуємо ВАХ для температури 25°C і інтенсивності сонячного випромінювання 1000 Вт/м². Струм є пропорційним інтенсивності сонячного випромінювання W (надалі використовуємо відносно значення до паспортного значення 1000 Вт/м²), тобто значення I_K і I_M визначаються згідно паспортним даним (I_{KP}, I_{MP}), як $I_K = WI_{KP}$ $I_M = WI_{MP}$. Загально прийнято вважати, що значення напруги U_X та U_M від W практично не залежать [8, 9] і дорівнюють паспортним значенням. Разом з тим, характеристики на рис.3 за різних значень W показують, що значення U_X в певних межах змінюється. Нехтування цим призведе до значної похибки, особливо зі зменшенням W

(показано на рис.3 для 400 Вт/м^2). Цю залежність можна враховувати в табличній формі або відповідним апроксимуючим поліномом.

Вплив температури відносно робочої температури ($t_p=45^\circ\text{C}$) визначається згідно температурним коефіцієнтам [12], що надаються для струму K_I ($0.0006 \text{ 1/}^\circ\text{C}$) і для напруги K_V ($0.0032 \text{ 1/}^\circ\text{C}$). Отже значення струмів і напруги становлять:

$$I_K = WI_{KP}[1 - K_I(t - t_p)], \quad I_M = WI_{MP}[1 - K_I(t - t_p)],$$
$$U_X = U_{XP}[1 - K_V(t - t_p)], \quad U_M = U_{MP}[1 - K_V(t - t_p)]. \quad (2)$$

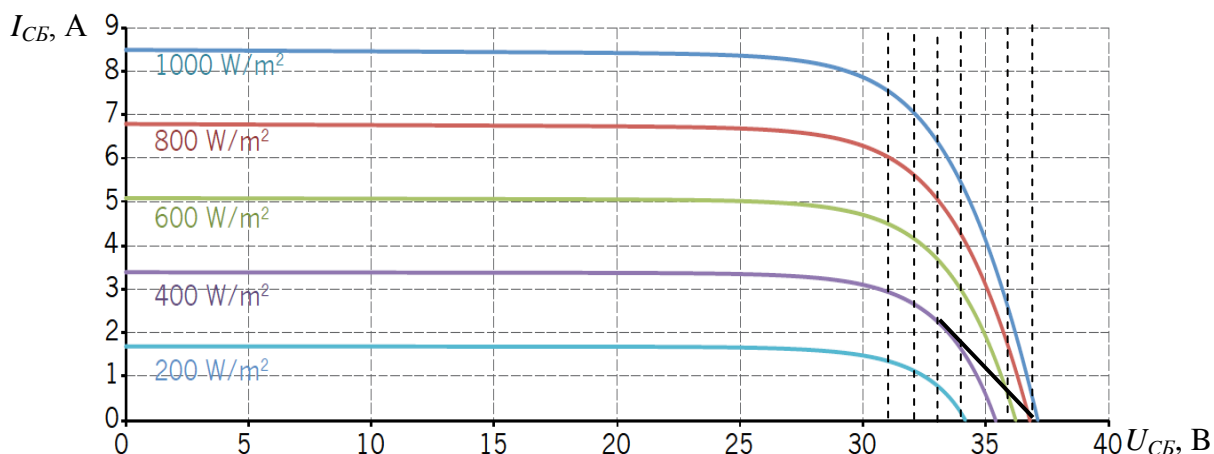


Рис. 3. ВАХ сонячної панелі типа LDK-245P-20

Розраховані згідно (1), (2) ВАХ достатньо близькі до тих, що надаються виготівником. Структура моделі окремої СП згідно (1), (2) наведена рис.4. СБ складається з певної кількості СП. В структурі моделі СБ (рис.5) використано кероване джерело струму і враховується активний і реактивний опори лінії зв'язку СБ та ПА. СБ містить дві гілки з 14 СП (типу LDK 250PA [12]).

В якості нелінійного реактору використано первинну обмотку трансформатору (стандартну модель) з нелінійною характеристикою магнітного кола (Saturable transformer), яка задається в табличному (кусочно-лінійному) вигляді відповідно значенню струму.

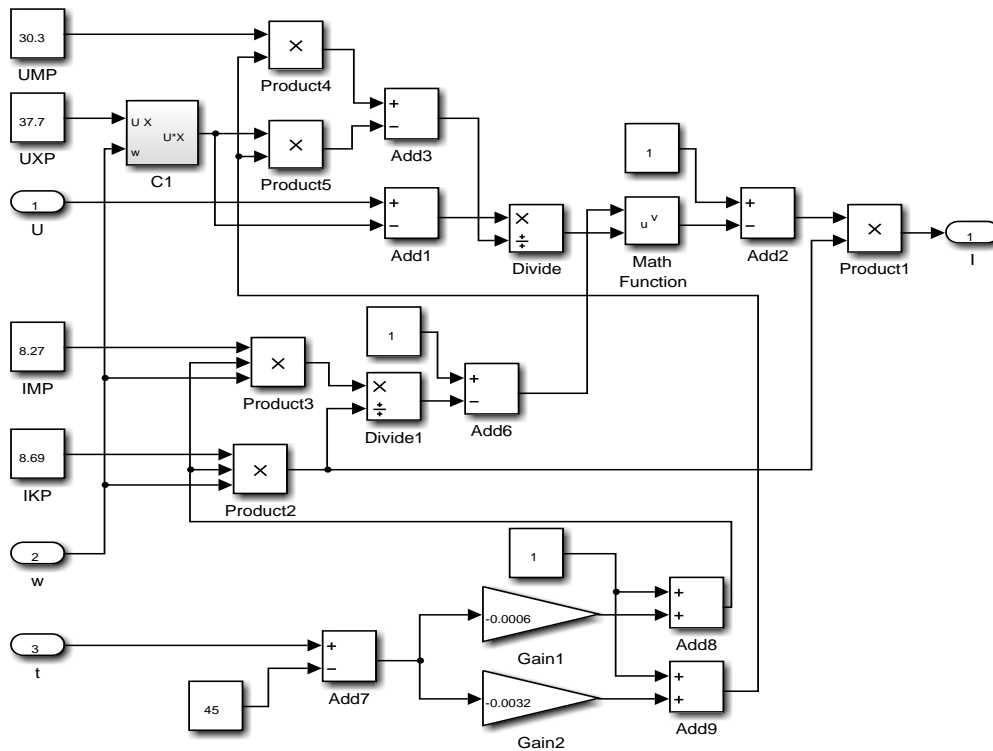


Рис. 4. Структура моделі СП

Заздалегідь, до використання в загальній моделі були виконані окремі дослідження щодо перевірки коректності отримання заданих значень індуктивності (від 0.0042 Гн до 0.00158 Гн) у робочому діапазоні струмів. За цього первинна обмотка підключалась до імпульсного джерела постійного струму і вимірювався її струм.

Визначення втрат потужності в ключах. Модель блока визначення втрат (БВВ) потужності в ключах (рис.6) базується на миттєвих значеннях струмів ключів (визначаються в загальній моделі ПА на рис.1 блоком Multimeter) і каталожних даних обраних приладів [13]. БВВ містить два модуля для ключів (транзистор зі зворотним діодом) одного плеча АІН. В якості входніх змінних використовуються миттєве значення вихідного струму (i), струм ключа АІН (i_K), час вимірювання (T_{on}), напруга на вході АІН U , частота вихідної напруги f .

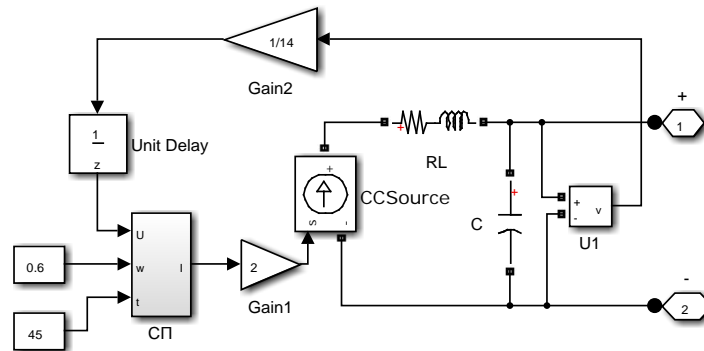


Рис. 5. Структура моделі СБ

Формування сигналів, відповідних моментам вмикання (on) і вимкнення (off) приладів в моделі здійснюється за допомогою блоків «Hit Crossing», «Edge Detector» згідно i_k .

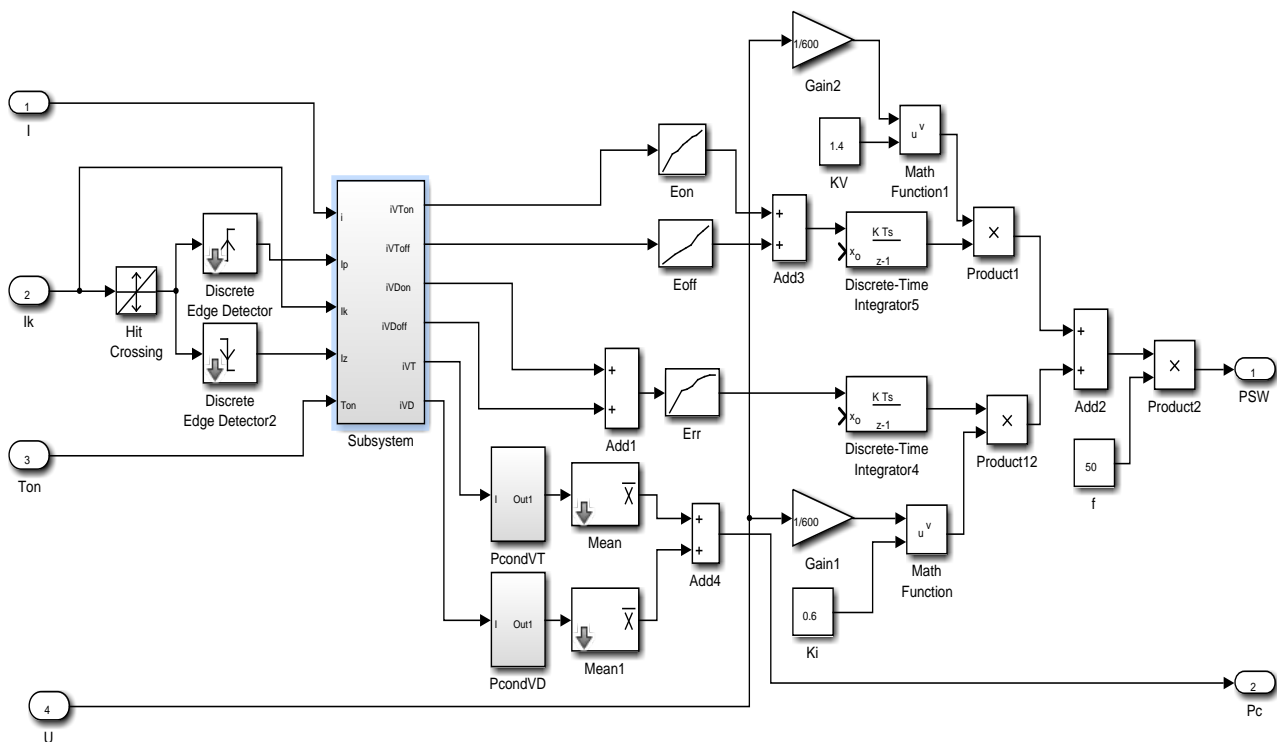


Рис.6. Структура моделі для визначення втрат потужності в ключі

За цього формуються імпульси, тривалість яких T_S , відповідно передньому I_P і задньому I_Z фронтам i_k . Блоком Subsystem відповідно до полярності струму i формуються сигнали P ($i > 0$) і N ($i \leq 0$). Ключ утворений зустрічно - паралельно з'єднаними IGBT і діодом. Струм транзистора $i_{VT} = P i_k$, діода $i_{VD} = N i_k$. Миттєві значення струмів ключів в момент перемикаються визначаються відповідно: $i_{VToff} = P T_{on} i_Z$, $i_{VTon} = P T_{on} i_P$, $i_{VDoff} = N T_{on} i_Z$, $i_{VDon} = N T_{on} i_P$.

Потужність втрат провідності P_c визначаються як середнє за період T вихідної частоти значення миттєвої потужності на приладі $p = u_V i_V$ (u_V, i_V – миттєві значення напруги і струму (діоду та транзистору)). Визначення u_V (згідно i_V відповідно до вихідної вольт-амперної характеристики [13], яка задається в табличній формі) з наступним перемноженням

u_V , i_V здійснюється в блоці Pcond. Для визначення середнього значення потужності використовується блок Mean.

Значення потужності втрат на перемикання P_{SW} визначаються за залежностями енергії перемикання [13] $E_{on}=f(i_{Von})$, $E_{off}=f(i_{Voff})$ для транзистору і E_{rr} – для діоду згідно значенню i_V в момент перемикання ключів. Для них визначаються E_{on} , E_{off} , E_{rr} . Підсумовування значень енергії перемикання здійснюється за допомогою інтегратора, який використовується як пристрій вибірки - зберігання з накопиченням. При цьому приріст вихідної напруги інтегратора на інтервалі вибірки T_S : $\Delta U = G \int E dt = G \cdot E \cdot T_S$, відповідно для забезпечення рівності $\Delta U = E$ його коефіцієнт $G = 1/T_S$. Значення енергії задаються при стандартному значенні напруги U_{CT} ($U_{CT}=600$ В для IGBT класу за напругою 1200 В) і температури $T_j=150^\circ\text{C}$. Для значень температури $< T_j$ втрати енергії зменшуються, тому для спрощення температура не враховувалась. Для перерахунку до фактичного значення напруги АІН U використано залежність $E' = E \left(\frac{U}{U_{CT}}\right)^{K_V}$ ($K_V=1.4$ для IGBT і $K_V=0.6$ для діода).

Час вимірювання вибирається кратним кількості періодів напруги вихідної частоти f , наприклад, $T_{on}=2T$. Формується генератором імпульсів з затримкою T_o , що враховує тривалість перехідного процесу зміни струму.

Результати моделювання. Навантаження об'єкту комбіноване: некерований випрямляч з вихідним ємнісним фільтром та RL навантаження. Модель РМ (220 В, $f=50$ Гц) містить опори $R=0.02$ Ом, $X_L=0.02$ Ом, фільтр $R_f=0.3$ Ом, $C_f=60$ мкФ. СБ містить дві гілки з 13 СП (LDK 250PA [12]). В блоці визначення втрат потужності використані параметри IGBT ключів типу SK50GH12T4T2 [13]. Розглядалось використання лінійного ($R=0.1$ Ом, $L=4.2$ мГн) та нелінійного реактору.

«Денний» режим роботи. Задається значення напруги $U_{CB}=400$ В (за режиму максимальної потужності $13 \cdot U_M=393.9$ В), змінюється значення W за постійного навантаження з $I_{Hm(1)}=14$ А, $\varphi_{(1)}=26.7^\circ$. У разі змінювання W змінюється значення струму i_L , що формується в точці підключення до РМ. За частоти модуляції 6.8 кГц і $I_{Im(1)}=2.68$ А значення $\text{THDi}_I=3.43$ %. Із збільшенням $I_{Im(1)}$ THDi_I зменшується (за $I_{Im(1)}=16.5$ А значення $\text{THDi}_I=1.1$ %). Проте ККД (без урахування втрат потужності в реакторі) $\eta \leq 0.972$. Зменшення втрат потужності у разі великих значень струму $I_{Im(1)}$ за припустимих значень THDi_I можливо у разі зменшення f_M . Так за значення $f_M=5$ кГц і $I_{Im(1)}=16.4$ А втрати потужності в ключах зменшуються на 29% і ККД $\eta=0.977$, проте за $I_{Im(1)}=2.68$ А значення $\text{THDi}_I=5.28$ % і діапазон значень струму з припустимим значенням THDi_I дещо зменшується.

Автономний режим роботи. Дослідження показали, що додатні показники якості відпрацьовування напруги навантаження і ККД забезпечуються у разі зниження коефіцієнта пропорційної ланки КРС k в 4 рази і зменшення частоти модуляції до 3.4 кГц. Так за $I_{Hm(1)}=14$ А, $\varphi_{(1)}=28^\circ$ значення $U_{Hm(1)}=311.6$ В (задане значення 312 В), $\text{THDi}_I=1.48$ %, $\eta=0.981$. У разі збільшення RL навантаження вдвічі, коли $I_{Hm(1)}=25.5$ А, $\varphi_{(1)}=31.49^\circ$ значення $U_{Hm(1)}=309.4$ В, $\text{THDi}_I=1.46$ %, $\eta=0.978$. Осцилограми напруги (мережі u_L , вхідної u та вихідної напруги АІН u_C) і струмів (мережі i_L , навантаження i_H , АІН i_C і СБ i_{CB}), що ілюструють початкове заряджання конденсатора в ланці постійного струму (з нульового значення U_{CB}) з наступною роботою в АРР наведені на рис.7. На інтервалі часу 0 – 0.4 с АІН

відключено від РМ, система регулювання не працює. Спочатку СБ працює в режимі КЗ, по мірі заряджання конденсатору струм СБ зменшується. Надалі запускається система регулювання. В момент часу $t=0.8$ с активно-індуктивне навантаження збільшується вдвічі.

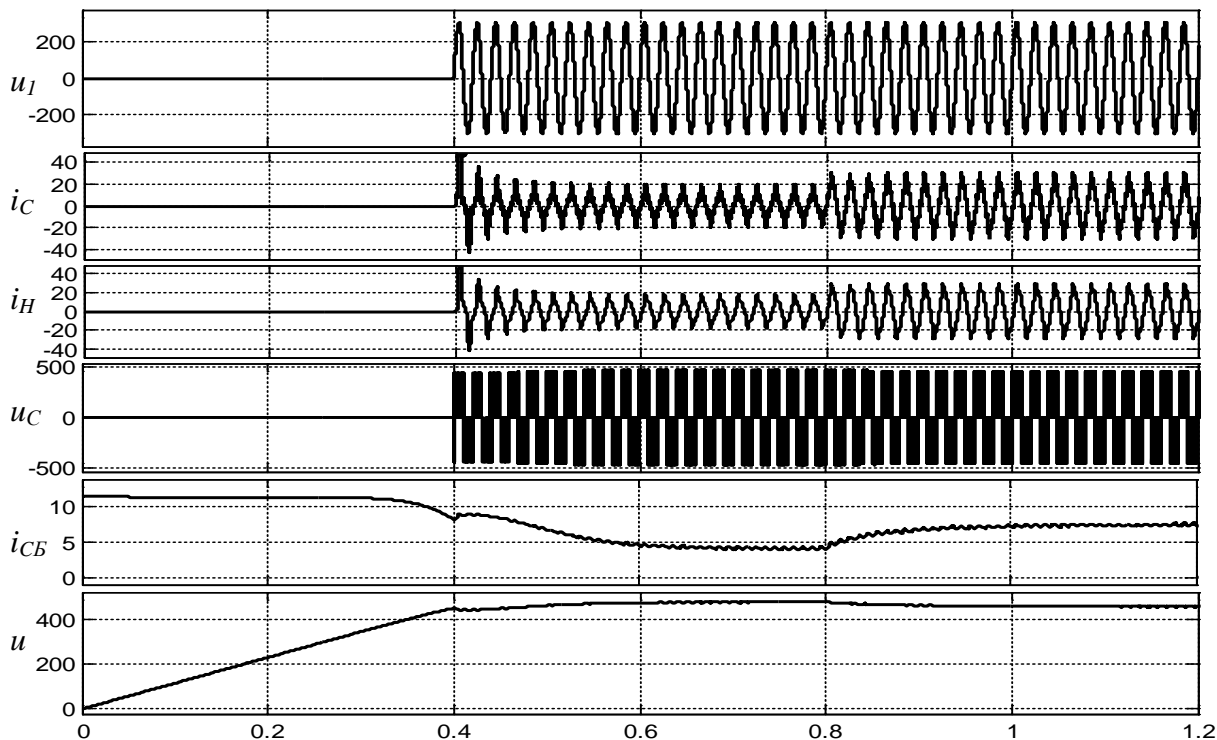


Рис. 7. Осцилограми напруги та струмів у разі вмикання і роботи БПА в АРР

На рис. 8 наведені осцилограми у разі перемикання з АРР до роботи паралельно з мережею. За цього маємо достатньо тривалий перехідний процес щодо відпрацювання заданого значення напруги, коли напруга СБ знижується до 400 В і енергія віддається в РМ. Це пов'язано з обмеженням струму – РН працює «під відсічку».

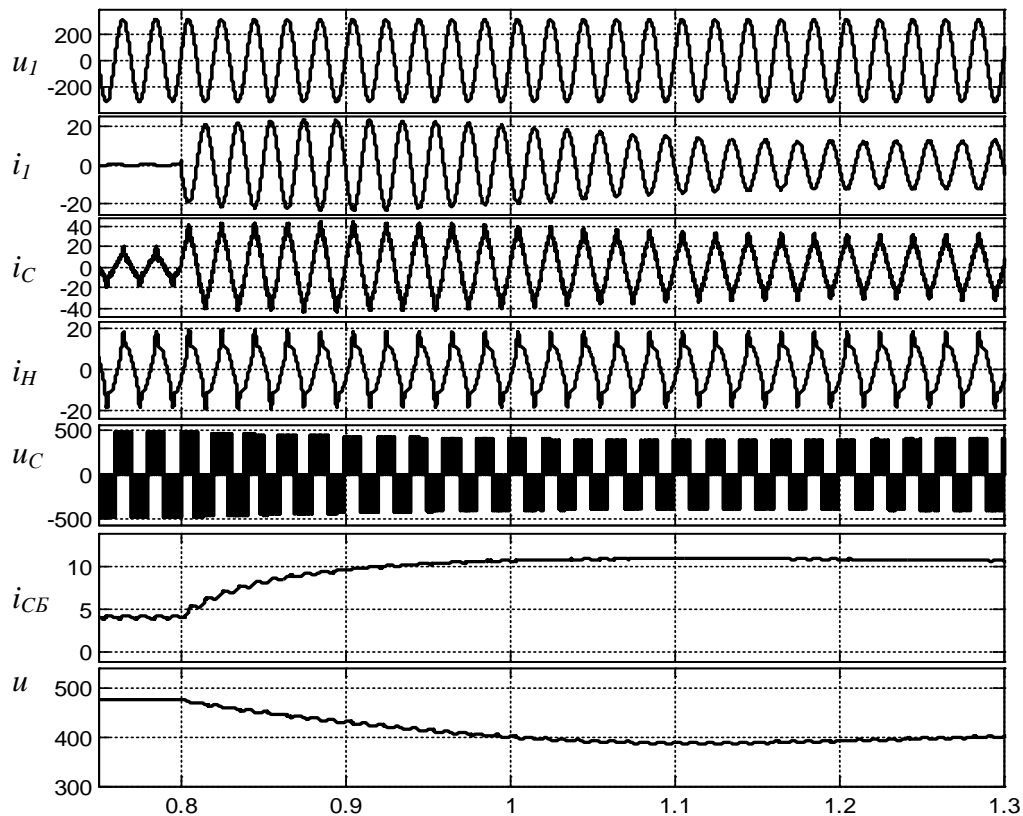


Рис.8. Осцилограми напруги та струмів у разі перемикання з APP до роботи паралельно з РМ

Використання нелінійного реактору. Дослідження роботи схеми з нелінійним реактором показали, що збільшення амплітуди пульсацій струму АІН внаслідок зменшення індуктивності призводить до погіршення якості струму i_l і збільшення THDi_1 . За незмінного налаштування КРС також маємо суттєве (в рази) зростання втрат потужності в ключах АІН. Проте в разі налаштування $k=0.5k^*$ (k^* - визначено для максимального значення $L=0.0042$ Гн) припустимі значення $\text{THDi}_1 \leq 5\%$ досягаються при $I_{lm(1)} > 3$ А з урахуванням зміни L в $2.5 \div 2.65$ разів відносно початкового (максимального) значення.

Висновки. Розроблена математична модель дозволяє здійснювати комплексне дослідження процесів в системі, що містить джерело змінного струму, перетворювальний агрегат з фотоелектричною батареєю та навантаження локального об'єкту. За цього здійснено уточнення налаштування системи керування ПА згідно обраним параметрам та забезпечення $\text{THDi}_1 \leq 5\%$ у максимальному діапазоні змінювання струму РМ для «денного» режиму та забезпечення придатного ККД у автономному режимі. Досліджено процеси в системі у разі перемикання режимів роботи БПА.

Напрямок подальших досліджень є розробка методу оцінювання спроможності СБ за потужністю у поточних умовах в автономному режимі роботи для систем з «інтелектуальним» керуванням енергоспоживанням локальних об'єктів.

Література

1. Zheng Zeng. Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review/ Zheng Zeng, Huan Yang, Rongxiang Zhao, Chong Cheng// *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24.- 2013. - P.223–270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.033>.
2. Шавєлкін А. А. Структури однофазних преобразовательних агрегатів для комбінованих систем електроживлення з фотоелектричними сонячними батареями / А. А. Шавєлкін // «Технічна електродинаміка» ІЕД НАН України № 2. – 2018. - С. 39 – 46. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2018.02.039>.
3. Шавьолкін О.О. Удосконалення структури контура регулювання струму з використанням ШІМ для мережевого інвертора комбінованої системи електроживлення/ О.О.Шавьолкін // Технічна електродинаміка ІЕД НАН України № 3.- 2019.- С.37–45, DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.037>
4. Шавьолкін О.О. Усунення похибки контуру регулювання струму багатофункціонального однофазного мережевого інвертора/ О.О. Шавьолкін, В.В. Каплун, І.О. Шведчикова// Електротехніка і Електромеханіка. 2019. №4.- С.35-40. doi: 10.20998/2074-272X.2019.4.05.
5. IEEE Std 519-1992 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. <http://www.ieee.org>.
6. 1547-2018 - IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. Date of Publication: 6 April 2018. Electronic ISBN: 978-1-5044-4639-6. DOI: [10.1109/IEEESTD.2018.8332112](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8332112).
7. Chih-Lung Shen. Grid-Connection Single-Stage Photovoltaic Inverter System with Double-Linear-Approximation MPPT/ Chih-Lung Shen and Jye-Chau Su// *Applied Mathematics & Information Sciences*. 9, No. 1L, pp.205-211 (2015). <http://dx.doi.org/10.12785/amis/091L26>.
8. Liying Huang. Modeling and Stability Analysis of a Single-Phase Two-Stage Grid-Connected Photovoltaic System/ Liying Huang,

References

1. Zheng Zeng, Huan Yang, Rongxiang Zhao, Chong Cheng (2013). Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24, 223–270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.033>.
2. Shavelkin A. A. (2018) Struktury odnofaznykh peretvoryval'nykh ahreativ dlya kombinovanykh system elektropostachannya z fotoelektrychnymy sonyachnymy batareyamy [Structures of single-phase converter units for combined power supply systems with photovoltaic solar batteries] *Tekhnichna elektrodinamika IED NAN Ukrayiny - Technical electrodynamic IED of NAS of Ukraine*, 2, 39 – 46 [in Russian]. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2018.02.039>.
3. Shavolkin O.O. (2019) Udoskonalennya struktury kontura rehulyuvannya strumu z vykorystannyam SHIM dlya merezhevoho invertora kombinovanoi systemy elektrozhyvlennya [Improvement of the structure of the current control loop using PWM for the network inverter of the combined power supply system] *Tekhnichna elektrodinamika IED NAN Ukrayiny - Technical electrodynamic IED of NAS of Ukraine*, 3, 37–45 [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.037>
4. Shavolkin O.O., Kaplun V.V., Shvedchykova I.O. (2019) Usunennya pokhybky konturu rehulyuvannya strumu bahatofunktsional'noho odnofaznoho merezhevoho invertora [Elimination of the error of the current control circuit of the multipurpose single-phase network inverter]. *Elektrotekhnika i Elektromekhanik - Electrical Engineering and Electromechanics*, 4, 35-40. [in Ukrainian] DOI: 10.20998/2074-272X.2019.4.05.
5. IEEE Std 519-1992 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. <http://www.ieee.org>.
6. 1547-2018 - IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. Date of Publication: 6 April 2018. Electronic ISBN: 978-1-5044-4639-6. DOI: [10.1109/IEEESTD.2018.8332112](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8332112).
7. Chih-Lung Shen and Jye-Chau Su. (2015) Grid-Connection Single-Stage Photovoltaic Inverter System with Double-Linear-Approximation MPPT. *Applied Mathematics & Information Sciences*. 9, No. 1L, pp.205-211. <http://dx.doi.org/10.12785/amis/091L26>.
8. Liying Huang, Dongyuan Qiu, Fan Xie, Yanfeng Chen and Bo Zhang. (2017) Modeling and Stability Analysis of a Single-Phase Two-Stage Grid-Connected Photovoltaic System. *Energies*, 10, 2176; doi:10.3390/en10122176. p.14.

Dongyuan Qiu, Fan Xie, Yanfeng Chen and Bo Zhang// Energies 2017, 10, 2176; doi:10.3390/en10122176. p.14.

9. Mohammed Amine Fares. Photovoltaic panels characterization and experimental testing/ Mohammed Amine Fares, Lotfi Atik, Ghalem Bachir, Michel Aillerie// International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES17, 21-24 April 2017, Beirut Lebanon. Article in Energy Procedia · July 2017.-pp.945-952. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.127.

10. Шавьолкін О.О. Однофазний інвертор комбінованої системи електроживлення з прямим підключенням фотоелектричної сонячної батареї/ О.О. Шавьолкін, О.В. Жила // Вісник КНУТД «Технічні науки» №5 (114), 2017, с. 106-116.

11. Шиняков Ю.А. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок/ Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурьгин, О.Е. Арбатова// Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), - Томск, 2010. – № 2 (22), Ч.2. - С.102-107. 12. Multicrystalline modules LDK-245-20 Professional series. www.ldksolar.com.

13. SEMIKRON IGBT modules. <https://www.semikron.com/products/product-classes/igbtmodules.html>

9. Mohammed Amine Fares, Lotfi Atik, Ghalem Bachir, Michel Aillerie. (2017) Photovoltaic panels characterization and experimental testing. International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES17, 21-24 April 2017, Beirut Lebanon. Article in Energy Procedia · July 2017.-pp.945-952. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.127

10. Shavolkin O.O., Zhila O.V. (2017) Odnofaznyy invertor kombinovanoi systemy elektrozhyvleniya z pryamym pidklyuchenniam fotoelektrychnoyi sonyachnoyi batareyi [Single-phase inverter of combined power supply system with direct connection of photoelectric solar battery] *Visnyk KNUTD - Bulletin of KNUTD*, 5(114), 106-116 [in Ukrainian].

11. Shinyakov Yu.A., Shurygin Yu.A., & Arkatova O.E. (2010) Povysheniye energeticheskoy effektivnosti avtonomnykh fotoelektricheskikh energeticheskikh ustanovok [Increase of power efficiency of independent photo-electric power installations]. *Elektronika, izmeritel'naya tekhnika, radiotekhnika i svyaz'. Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2 (22), 102-107 [in Russian].

12. Multicrystalline modules LDK-245-20 Professional series. Retrieved from www.ldksolar.com.

13. SEMIKRON IGBT modules. Retrieved from: <https://www.semikron.com/products/product-classes/igbtmodules.html>.

SHAVOLKIN OLEXANDER

shavolkin@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3914-0812>

Researcher ID: T-2652-2018

Kiev National University of Technologies & Design

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБЪЕКТА С МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ АГРЕГАТОМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ БАТАРЕИ ШАВЁЛКИН А. А., СТАНОВСКИЙ Е. Ю., ПИДГАЙНЫЙ Н. О.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Разработка детализированной математической модели системы «сеть - многофункциональный преобразовательный агрегат с фотоэлектрической батареей - нагрузка», которая позволит осуществить комплексное исследование процессов в системе с оценкой эффективности агрегата.

Методика. Синтез структуры модели и системы управления агрегатом на базе анализа процессов в электрических цепях с использованием компьютерного моделирования.

Результаты. Зависимости для аппроксимации вольтамперной характеристики фотоэлектрической батареи. Предложено использование в качестве нелинейного реактора стандартной модели трансформатора с насыщением магнитной цепи. Модель для определения потерь мощности в полупроводниковых ключах по мгновенным значениям токов и напряжений и их каталожным данным.

Научная новизна. Усовершенствована математическая модель фотоэлектрической батареи по паспортным данным с введением зависимости напряжения холостого хода от интенсивности солнечного излучения. Усовершенствована структура системы управления с внутренним контуром регулирования тока и переключением внешних регуляторов согласно режимам работы: при работе с сетью в «дневном» режиме это регулятор напряжения фотоэлектрической батареи, в «ночном» - регулятор входного напряжения инвертора; в автономном режиме - регулятор напряжения нагрузки. Обосновано изменение настройки контура регулирования тока и частоты модуляции в автономном режиме, что исключает рост потерь мощности в ключах.

Практическое значение. Полученные решения являются основой для проектирования и анализа показателей многофункциональных преобразовательных агрегатов для систем с возобновляемыми источниками электроэнергии с улучшенной энергоэффективностью.

Ключевые слова: многофункциональный преобразовательный агрегат, ШИМ, потери мощности в ключах, фотоэлектрическая батарея, переключение режимов работы агрегата, коэффициент гармоник, моделирование.

MODELING OF THE COMBINED ELECTRIC POWER SYSTEM OF A LOCAL OBJECT WITH MULTIFUNCTIONAL CONVERTER UNIT OF PHOTOVOLTAIC BATTERY SHAVOLKIN O. O., STANOVSKYI YE. YU., PIDHAINYI M. O.

Kiev National University of Technologies and Design

Purpose. The development of a detailed mathematical model of the system "network - multifunctional converter unit with a photovoltaic battery - load", which will allow for a comprehensive study of the processes in the system with an assessment of the efficiency of the unit.

Methodology. Synthesis of the structure of the model and the control system of the unit based on the analysis of processes in electrical circuits using computer simulation.

Findings. Dependencies for approximating the current-voltage characteristics of a photovoltaic battery. The use of a standard model of a transformer with magnetic circuit saturation as a nonlinear reactor is proposed. A model for determining power losses in semiconductor switches by the instantaneous values of currents and voltages and their catalog data.

Originality. The mathematical model of the photovoltaic battery is improved according to the passport data with the introduction of the dependence of the open circuit voltage on the intensity of solar radiation. The structure of the control system with an internal current control loop and switching external controllers according to the operating modes has been improved: when working with the network in the "day" mode, it is the voltage controller of the photoelectric battery, in the "night" mode it is the inverter input voltage controller; in standalone mode - load voltage controller. There is a justified change in the settings of the current control loop and the modulation frequency in the standalone mode to eliminate the growth of power losses in the switches.

Practical value. The obtained solutions are the basis for the design and analysis of indicators of multifunctional converting units for systems with renewable energy sources with improved energy efficiency.

Keywords: multifunctional converting unit, PWM, power loss in the keys, photovoltaic battery, switching operation modes of the unit, THD, modeling.

УДК 004.423.2:004.
514:621.3.077.6

ЗЛОТЕНКО Б. М., СТАЦЕНКО Д. В.

Київський національний університет технологій та дизайну

**КОМП'ЮТЕРНА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СИСТЕМА
КЕРУВАННЯ ОПАЛЕННЯМ ТА ГАРЯЧИМ
ВОДОПОСТАЧАННЯМ БУДІВЕЛЬ**

***Мета.** Розробка і аналіз комп'ютерної дистанційної системи керування опаленням та гарячим водопостачанням приміщень.*

***Методика.** У роботі використані методи порівняльного аналізу, моделювання, спостереження, вимірювання та дослідження електропривода.*

***Результати.** Розглянута система підключення бойлера між двоконтурним котлом та користувачами гарячого водопостачання, а також дистанційна комп'ютерна система керування нею. Схематично показана конструкцію та принцип її дії. Представлено принцип дії програми керування системою на основі використання датчиків. Мікроконтролер Arduino отримує та оброблює інформацію з датчиків, на основі якої автоматично керує системою опалення та гарячого водопостачання. Також оброблена інформація, за допомогою передачі даних на WEB сервер, надходить на інтерактивні прилади користувача, який може дистанційно перевіряти стан система та за необхідністю керувати нею. Дистанційний моніторинг та керування високопотужним обладнанням є важливою складовою його експлуатації, що забезпечує підвищення безпеки користування. Проведені розрахунки та аналіз витрат на природний газ та електроенергію з використанням запропонованої системи та без неї у опалювальний період. Аналіз отриманих результатів даних показав, що запропонована система забезпечує енергоефективність системи опалення та гарячого водопостачання, а також дозволяє зменшити витрати природного газу та електроенергії.*

***Наукова новизна.** Розглянута та проаналізована комп'ютерна дистанційна система керування опаленням та гарячим водопостачанням, яка дозволяє зменшити енерговитрати та вартість її обслуговування.*

***Практична значимість.** Отримані результати дозволяють використовувати більш енергоефективну систему опалення та гарячого водопостачання будівель.*

***Ключові слова:** мікроконтролер, Arduino, бойлер, котел, опалення, гаряче водопостачання, система керування.*

Вступ. Власники приміщень без центрального опалення, загалом, стикаються з питанням організації системи опалення та гарячого водопостачання (ГВП). Для цього власники приміщень доволі часто використовують газові котли або газові колонки. В цій статті ми розглянемо систему ГВП з двоконтурним котлом. Така система виходить відносно дешевою і займає мало місця [1-3]. Однак, робота ГВП з двоконтурним котлом (колонкою) має свої недоліки. Проточний теплообмінник ГВП двоконтурного котла починає гріти воду в момент початку розбору води. Щоб отримати воду необхідної температури за малий проміжок часу конструкція проточного водонагрівача передбачає обмеження швидкості потоку води. Температура води на виході з проточного нагрівача дуже сильно залежить від витрати води. Загалом використання двоконтурного котла в системі ГВС призводить до необґрунтованого зростання споживання води і обсягу стоків каналізації, до збільшення витрат електроенергії та газу на нагрів, а також до недостатнього комфорту при користуванні гарячою водою в будинку.

Один з варіантів, який може частково поліпшити роботу такої ГВП та зменшити її недоліки, а також покращити комфортні умови користування водою – встановити між двоконтурним котлом і споживачами гарячої води електричний накопичувальний водонагрівач – бойлер[4-6].

Постановка завдання. Електричний бойлер, в даному випадку, використовують в якості буферної ємності між котлом і споживачами гарячої води. З контуру ГВП двоконтурного котла гаряча вода, перш ніж потрапити споживачеві, надходить в електричний бойлер. Гаряча вода в водорозбірні крани подається вже з бойлера. Таким чином, електричний бойлер служить для зберігання запасу гарячої води, нагрітої газовим котлом. Крім того, температура води в бойлері підтримується на заданому рівні за рахунок включення ТЕНа. Але недоліком такої системи є підвищене споживання електроенергії на підігрів води. Електроенергія витрачається для компенсації теплових втрат, для зберігання гарячої води в бойлері, а також на нагрів тієї частини води, яка надходить з котла в бойлер холодною.

Мета даної роботи полягає в тому, щоб підвищити якість енергоефективності вищенаведеної системи ГВП шляхом використання системи дистанційного зв'язку та керування. Система керування через WEB інтерфейс значно дешевша, простіша у виконанні і не потребує дорогого обладнання для роботи. Керування може бути здійснено за допомогою телефону чи планшету без необхідності встановлювати додаткове програмне забезпечення.

Результати та їх обговорення. Удосконалення системи ГВП полягає у використанні системи керування на основі мікроконтролера Arduino, що працює з модулем Ethernet SHIELD [7, 8]. Загальна схема підключення до двоконтурного котла електричного бойлера показана на рис. 1.

Система керування ГВП спроектована таким чином, щоб з одного боку – бути автоматичною і керувати основними елементами без участі людини, з іншого боку користувач за допомоги зручного WEB інтерфейсу може зчитувати дані та вмикати та вимикати систему самостійно.

Розрахуємо та проаналізуємо витрати на природний газ та електроенергію з використанням запропонованої системи та без неї у опалювальний період. Для розрахунку будемо використовувати усереднені значення для приміщень, які знаходяться в Києві чи області. Використаємо формулу для розрахунку витрат газу:

$$V = Q / (q * \eta / 100) \quad (1)$$

де V – об'ємні витрати природного газу на годину, Q – величина тепловтрат і потужності опалювальної системи, q – нижча питома калорійність природного газу, в середньому $9,2 \text{ кВт*год/м}^3$, η – коефіцієнт корисної дії газового котла або конвектора.

Тепловитрати Q розраховуються за наступною формулою:

$$Q = F(t_n - t_3)(1 + \sum \beta)n/R_0 \quad (2)$$

де t_z – температура зовнішнього середовища, t_n – температура у приміщенні, F – площа приміщення, n – коефіцієнт, що враховує положення стін між приміщенням та зовнішнім середовищем, β – тепловтрати додаткові від основних, R_0 – опір теплопередачі.

Візьмемо приміщення площею 80 м^2 . Для його обігріву, відповідно до розрахунків, в холодний період необхідно $6,4 \text{ кВт}$. Приймемо котел з ККД 96% , відповідно $V - 0,67 \text{ м}^3/\text{г}$. Споживання газу на добу буде становити $21,84 \text{ м}^3$.

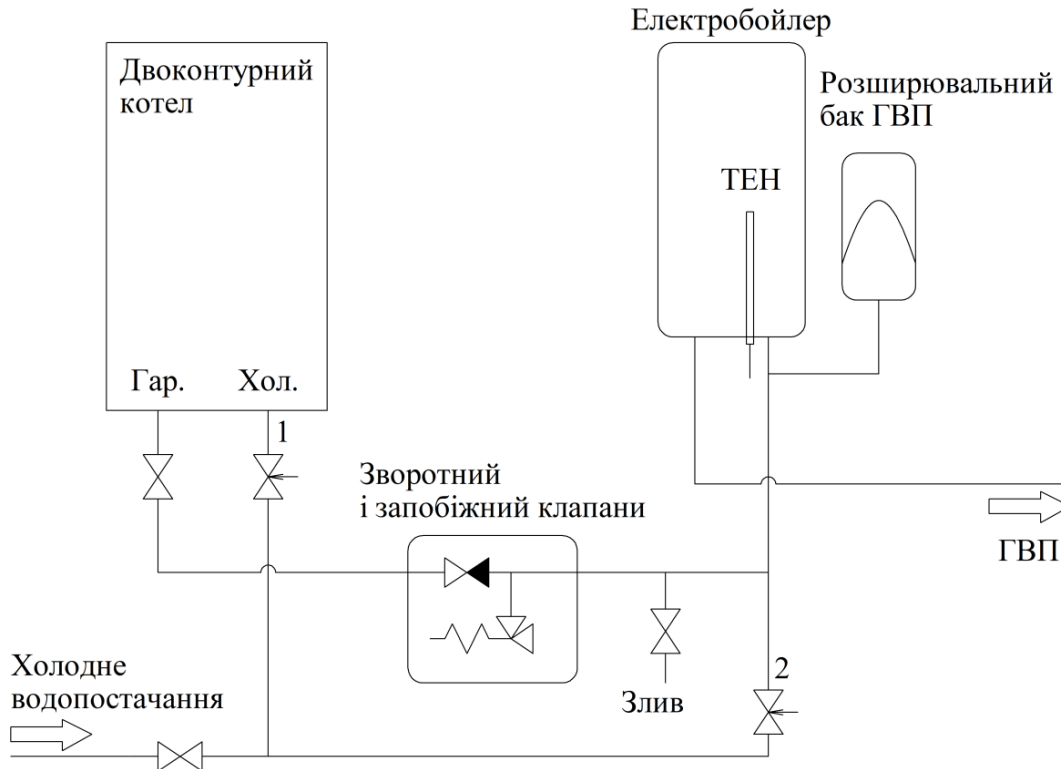


Рис. 1. Схема підключення бойлера до двоконтурного газового котла

З урахуванням вищенаведеного, та знаючи, що з 1 листопада 2018 року по 30 квітня 2019 року [9] ціна на природний газ для населення становила $8,54892 \text{ грн}/\text{м}^3$ з ПДВ, отримаємо вартість споживаного газу, прийнявши кількість діб 151 за 5 місяців, яка для розглянутого випадку становить $28192,97 \text{ грн}$.

Спираючись на метеорологічні дані [10] за вищенаведений період можна визначити кількість діб коли середньодобова температура була вище $0 \text{ }^\circ\text{C}$ і за допомогою запропонованої дистанційної системи керування обрахувати кількість діб необхідних для обігріву приміщення, яка становить 121 , відповідно загальна вартість споживаного газу дорівнює $22591,72 \text{ грн}$. Загальна економія становить $5601,25 \text{ грн}$.

Розрахуємо витрати на природний газ для ГВП. Для цього використаємо наступну формулу:

$$Q = cm\Delta t \quad (3)$$

де c – теплоємність води, m – масові витрати води, Δt – різниця між початковою та кінцевою температурою.

Відповідно до формули, для нагріву 80 літрів води на добу, Q буде дорівнювати 4,6 кВт. Далі за формулою (1) об'єм споживаного природного газу на добу буде складати – 0,48 м³.

Розрахуємо споживання електроенергії для бойлера. Для цього використаємо спрощену формулу визначення часу, для нагріву води у водонагрівачі з постійним коефіцієнтом:

$$T = 0,00117 * V * (t_k - t_n) / W \quad (4)$$

де T – час нагріву води, V – об'єм баку бойлера, t_k – кінцева температура, t_n – початкова температура W – потужність нагрівача.

Прийmemo, що використовується бойлер об'ємом 80 літрів, потужністю 1,2 кВт, а середня добова норма споживання води на 4 особи – 250 літрів. У випадку, коли бойлер підключено окремо, $t_k = 60$ °С, $t_n = 15$ °С, тоді час нагріву води буде складати $T = 3,51$ год. Відповідно за добу витрати будуть складати $250/80 * 3,51 * 1,2 = 13,61$ кВт*год, за період опалення 2055,11 кВт*год. Відповідно до тарифу електроенергії 1,68 грн за кВт*год, що в середньому складає 3452,6 грн.

Якщо використовувати запропоновану систему тоді змінюється t_n , з урахуванням того, що температура води, яка надходить у бойлер буде близька до 60 °С, відповідно бойлер буде вмикатися з меншою частотою, але постійні витрати гарячої води все одно будуть зменшувати значення початкової температури. Виходячи з цього, прийmemo середнє значення $t_n = 38$ °С, тоді час нагріву води буде складати $T = 1,716$ г. За добу 6,435 кВт*год, за весь період 971,685 кВт*год. Вартість чого буде складати 1632,43 грн. Виходячи з цього економія буде складати 1820.17 грн. Загальні дані наведені на діаграмі (рис. 2).

В мікроконтролер Arduino завантажено програму, яка спеціально спроектована для роботи з даною системою ГВП, а саме з обраними датчиками та електромеханічними елементами. Перевагою використання мікроконтролера слугує і те, що всі дані про стан приладу від нього подаються на Ethernet SHIELD який передає дані на WEB сервер, де користувач може переглядати і керувати приладом дистанційно з будь якого пристрою, який має доступ до мережі Інтернет і здатний працювати з WEB сторінками.

До мікроконтролера під'єднанні наступні датчики: температури зовнішнього повітря, температури повітря в приміщенні, вимірювання температури води, вологості, а також датчик руху. Також в систему входить реле для під'єднання приладу до електричної мережі живлення та керуванням КЕК.

Перший сценарій передбачає, що на довгий проміжок часу не планується проживання мешканців, але при цьому приміщення необхідно опалювати, щоб уникнути пошкоджень. Для цього мікроконтролер аналізує дані з датчиків температури зовнішнього повітря та температури повітря в приміщенні. Після цього він відправляє сигнал на котел, вмикає його та задає

необхідну температуру опалення. Датчик температури зовнішнього повітря надає інформацію про температуру зовнішнього середовища. Він відправляє на мікроконтролер дані, після аналізу яких, система керування змінює температуру опалення приміщення. В даному випадку при значних змінах температури навколишнього середовища, можливе економне споживання ресурсів, для підтримання постійної мінімально необхідної температури приміщення. Датчик вимірювання температури повітря в приміщенні надає інформацію про температуру. У разі її збільшення вище запрограмованого значення система реагує, як на пожежу в приміщенні. Вимикає систему нагрівального приладу й перекриває КЕК 1 на подачу води до приладу, чим забезпечує додатковий захист від ураження електричним струмом і поширення пожежі.

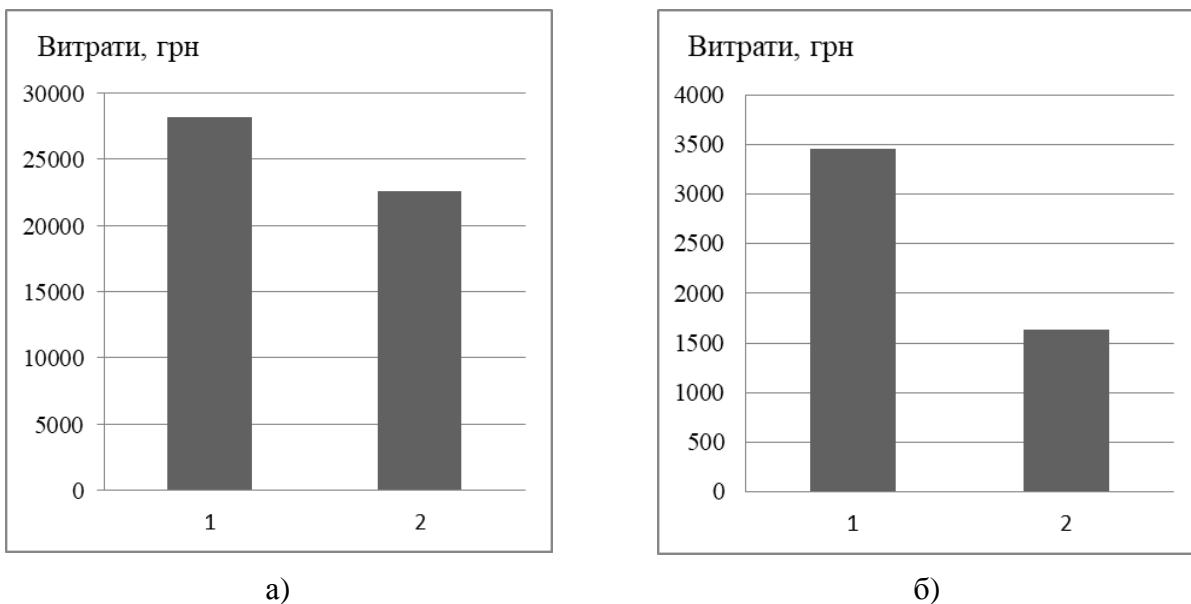


Рис. 2. Діаграми аналізу грошових витрат: А) Аналіз результатів даних для котла (1 – без запропонованої системи керування; 2 – з використанням системи); Б) Аналіз результатів даних для бойлера (1 – без запропонованої системи керування; 2 – з використанням системи)

Другий сценарій починає працювати, коли приміщення не потребує опалення, але в ньому мешкають люди і відбувається споживання ГВП. Даний режим вмикається, як і перший за допомогою WEB інтерфейсу, а також має можливість вмикатися автоматично за рахунок датчика руху. Програма мікроконтролера налаштована таким чином, щоб при відсутності сигналу з датчиків руху протягом вказаного проміжку часу система буде вимкнена автоматично. Датчик вимірювання температури води працює по алгоритму, аналогічному датчику вимірювання температури приміщення. Обидва датчики виводять свої покази на інтерфейс користувача, що дає змогу оцінити стан роботи приладу. Датчик води, за наявності води в корпусі приладу, автоматично відключає живлення і перекриває кульковий кран. Якщо показники датчиків не відповідають запрограмованим, контролер не дасть змогу увімкнути прилад до усунення несправності або до тих пір, поки показники не придуть в норму.

Третій сценарій передбачає одночасне керування бойлером та котлом. Найбільш ефективно використання даної системи ГВП досягається лише при умові, якщо в приміщенні знаходяться мешканці та необхідне опалення приміщення. Користувач може самостійно встановлювати температуру ГВП за допомогою смартфона чи планшета. Мікроконтролер на основі аналізу результатів, отриманих з датчиків температури води у бойлері, за необхідністю буде відправляти сигнал на включення ТЕНа. В результаті цього, котел буде менше перезапускатися, що сповільнить скорочення ресурсу його роботи. ККД водонагрівача збільшиться і зменшиться витрата газу. Гаряча вода буде з'являється без затримки. Частина води не буде марно йти в каналізацію.

Висновки. Розглянута та проаналізована система керування ГВП двоконтурного котла та бойлера на основі використання мікроконтролера Arduino з дистанційним зв'язком та керуванням через мережу інтернет. Аналіз отриманих результатів даних підтвердив, що запропонована система забезпечує енергоефективність системи опалення та ГВП, а також дозволяє зекономити 5601,25 грн. для оплати газу та 1820.17 грн. для оплати електроенергії. Відповідно, що дистанційний моніторинг та керування високотужним обладнанням є важливою складовою його експлуатації, що несе практичну економію енергії й підвищення безпеки користування.

Література

1. Барало О. В. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: Навчальний посібник / О.В. Барало, П.Г. Самойленко, С.С. Гранат, В.О. Ковальов – К.: Аграрна освіта, 2010. – 557 с.
2. Любарець О. П. Проектування Систем водяного опалення: посібник для проектувальників, інженерів студентів технічних ВНЗ / О. П. Любарець, О. М. Зайцев, В. О. Любарець – Відень - Київ – Сімферополь, 2010. – 200 с.
3. Дзядикевич Ю.В. Енергетичний менеджмент. Підручник / Ю.В. Дзядикевич, Р.Б. Гевко, М.В. Буряк, Р.І. Розум. – Тернопіль: Підручники і посібники. – 2014. – 336 с.
4. Усольцев А. А. Общая электротехника: Учебное пособие. / А. А. Усольцев – СПб: СПбГУИТМО, 2009. – 301 с.
5. Біла Т. Я. Електропобутова техніка. Навчальний посібник / упор.: Т. Я. Біла, М. Й. Бондаренко, О. П. Бурмістенков, Б. М. Злотенко, І. В. Петко. – К.: КНУТД, 2014. – 96 с.
6. Пырков В.В. Гидравлическое регулирование систем отопления и охлаждения. Теория и

References

1. Baralo O. V., Samoilenko P. H., Hranat S.Ye., Kovalov V.O. (2010) Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv i systemy avtomatichnoho keruvannia [Automation of technological processes and systems of automatic processing] K.: Ahrarna osvita [in Ukrainian]
2. Liubarets O. P., Zaitsev O. M., Liubarets V. O. (2010) Proektuvannia System vodianoho opalennia [Designing of water heating systems] Vienna - Kiev – Simferopol [in Ukrainian]
3. Dziadykevych Yu.V., Hevko R.B., Buriak M.V., Rozum R.I. (2014) Enerhetychnyi menedzhment [Energy management] Ternopil: Pidruchnyky i posibnyky. [in Ukrainian]
4. Usol'tsev A. A. (2009) Obshchaya elektrotekhnika [General electrical engineering] SPb: SPbGUITMO [in Russian]
5. Bila T. Ya., Bondarenko M. Y., Burmistenkov O. P., Zlotenko V. M., Petko I.V. (2014) Elektropobutova tekhnika [Household appliances] K.: KNUTD [in Ukrainian]
6. Pyrkov V. V. (2005) Gidravlichesкое regulirovanie sistem otopeniya i okhlazhdeniya [Hydraulic regulation of heating and cooling

практика. / В.В. Пыркков // К.: Таки справи, 2005, с.302.

7. Злотенко Б. М. Вдосконалення енергоефективної системи керування освітленням і температурою приміщень / Б. М. Злотенко, Д. В. Стаценко // Вісник Хмельницького національного університету. Серія : Технічні науки. – 2017. – № 5 (253). – С. 240-243.

8. Авдієнко Є. О. Розробка системи керування побутового електробойлера [Електронний ресурс] / Є. О. Авдієнко, Б. М. Злотенко, Т. І. Кулік // Технології та дизайн. - 2018. - № 2 (27). - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2018_2_13.

9. Сайт КИЇВГАЗ. Ціни на природний газ для населення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://energy.kyivgaz.ua/ofitsijna-informatsiya/tsini-ta-tarifi-na-gaz>

10. Сайт Meteoblue. Метеорологический архив Киев [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.meteoblue.com/ru/%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0/historyclimate/weatherarchive/%d0%9a%d0%b8%d0%b5%d0%b2_%d0%a3%d0%ba%d1%80%d0%b0%d0%b8%d0%bd%d0%b0_703448

systems] К.: Таки справи [in Russian]

7. Zlotenko B. M., Statsenko D. V. (2017) Vdoskonalennia enerhoefektyvnoi systemy keruvannia osvittleniam i temperaturoiu prymishchen [Improvement of the energy efficient lighting and temperature control system for premises] Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu № 5 (253) 240-243p. [in Ukrainian]

8. Avdiienko Ye. O., Zlotenko B. M., Kulik T. I. (2018) Rozrobka systemy keruvannia pobutovoho elektroboilera [Development of a control system for household electric boilers] K: Tekhnolohii ta dyzain Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2018_2_13 [in Ukrainian]

9. KYIVGAS Website. Natural gas prices for the population. Retrieved from: <https://energy.kyivgaz.ua/ofitsijna-informatsiya/tsini-ta-tarifi-na-gaz> [in Ukrainian]

10. Meteoblue website. Meteorological archive Kiev. Retrieved from: https://www.meteoblue.com/ru/%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0/historyclimate/weatherarchive/%d0%9a%d0%b8%d0%b5%d0%b2_%d0%a3%d0%ba%d1%80%d0%b0%d0%b8%d0%bd%d0%b0_703448 [in Russian]

STATSENKO DMYTRO
ResearcherID: C-3644-2017
ORCID: orcid.org/0000-0002-3064-3109
Kyiv National University of Technologies & Design

ZLOTENKO BORYS
zlotenco@ukr.net
ORCID: orcid.org/0000-0002-0870-8535
Kyiv National University of Technologies & Design

КОМПЬЮТЕРНАЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОТОПЛЕНИЕМ И ГОРЯЧИМ ВОДОСНАБЖЕНИЕМ ЗДАНИЙ ЗЛОТЕНКО Б. Н., СТАЦЕНКО Д. В.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Разработка и анализ компьютерной дистанционной системы управления отоплением и горячим водоснабжением помещений.

Методика. В работе использованы методы сравнительного анализа, моделирования, наблюдения, измерения и исследования электропривода.

Результаты. Рассмотрена система подключения бойлера между двухконтурным котлом и пользователями горячего водоснабжения, а также дистанционная компьютерная система управления ею. Схематически показано конструкцию и принцип ее действия. Представлены принцип действия программы управления системой на основе использования датчиков. Микроконтроллер Arduino

получает и обрабатывает информацию с датчиков, на основе которой автоматически управляет системой отопления и горячего водоснабжения. Также обработанная информация, посредством передачи данных на WEB сервер, поступает на интерактивные приборы пользователя, который может дистанционно проверять состояние система и при необходимости управлять ею. Дистанционный мониторинг и управление высокомоощным оборудованием является важной составляющей его эксплуатации, который обеспечивает повышение безопасности пользования. Приведены расчеты и анализ затрат на природный газ и электроэнергию с использованием предложенной системы и без нее в отопительный период. Анализ полученных результатов данных показал, что предложенная система обеспечивает энергоэффективность системы отопления и горячего водоснабжения, а также позволяет уменьшить расход природного газа и электроэнергии.

Научная новизна. Рассмотрена и проанализирована компьютерная дистанционная система управления отоплением и горячим водоснабжением, которая позволяет уменьшить энергозатраты и стоимость ее обслуживания.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют использовать более энергоэффективную систему отопления и горячего водоснабжения зданий.

Ключевые слова: микроконтроллер, Arduino, бойлер, котел, отопление, горячее водоснабжение, система управления.

COMPUTER ENERGY EFFICIENT SYSTEM OF BUILDINGS HEATING AND HOT WATER SUPPLY

ZLOTENKO B., STATSENKO D.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Development and analysis of a computer remote control system for heating and hot water supply of premises.

Methodology. The methods of comparative analysis, modeling, observation, measurement and research of the electric drive were used in the work.

Findings. A system for connecting a boiler between a dual-circuit cauldron and users for hot water supply, as well as a remote computer control system for it, was considered. The design and principle of its action were shown schematically. The principle of the system management program based on the use of sensors was presented. The Arduino microcontroller receives and processes information from sensors, based on which it automatically controls the heating system and hot water supply. In addition, the processed information, by transmitting data to the WEB server, is transmitted to the user's interactive devices, which can remotely check the status of the system and, if necessary, manage it. Remote monitoring and control of high-power equipment is an important component of its operation, which ensures increased safety of use. Calculations and analysis of costs for natural gas and electricity using the proposed system and without it during the heating period were presented. An analysis of the data results showed that the proposed system provides energy efficiency of the heating system and hot water supply, and allows reducing the consumption of natural gas and electricity.

Originality. The computer remote control system for heating and hot water supply, which allows to reduce energy consumption and the cost of its maintenance, is considered and analyzed.

Practical value. The obtained results make it possible to use a more energy-efficient heating and hot water supply system in buildings.

Keywords: microcontroller, Arduino, boiler, cauldron, heating, hot water, control system.

УДК 621.3-5:
678.7.05

БУРМІСТЕНКОВ О. П., БІЛА Т. Я., СТАЦЕНКО В. В.
Київський національний університет технологій та дизайну

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета. Визначення енергетичних параметрів обладнання для змішування сипких матеріалів.

Методика. У роботі використані методи математичного моделювання, порівняльного аналізу та дослідження електроприводу. Дослідження руху частинок всередині змішувача здійснено на основі законів теоретичної механіки.

Результати. Розглянуто особливості конструкції змішувачів сипких матеріалів безперервної та періодичної дії. Показано принцип дії та енергоспоживання стрічкового змішувача періодичної дії із продуктивністю 4000 кг/год. Представлено конструкцію та принцип роботи відцентрового змішувача безперервної дії. Наведено математичну модель руху частинок всередині відцентрового змішувача безперервної дії. Проведено аналіз взаємного розташування частинок сипкого матеріалу у роторі та визначено умови за яких забезпечується якісний процес змішування. Запропоновано математичні моделі, що дозволяють визначити конструктивні та технологічні параметри змішувача виходячи із заданої продуктивності. Визначено режими роботи за яких обладнання споживає максимальну кількість енергії. Запропоновано алгоритм визначення потужності електроприводу відцентрового змішувача безперервної дії. Представлено результати порівняльного аналізу енергоспоживання змішувачів безперервної та періодичної дії, що мають однакову продуктивність. Проведено дослідження режимів роботи та чинників, що впливають на енергоспоживання.

Наукова новизна. Отримані математичні моделі, що дозволяють визначити взаємозв'язок між продуктивністю відцентрового змішувача безперервної дії, його режимами роботи та енергоспоживанням.

Практична значимість. Отримані результати дозволяють здійснювати обґрунтований вибір обладнання для змішування сипких матеріалів.

Ключові слова: змішувач, сипкий матеріал, стрічковий змішувач, відцентровий змішувач, енергоспоживання, моделювання.

Вступ. Процеси змішування сипких матеріалів застосовуються у легкій, хімічній, харчовій, будівельній та інших галузях промисловості [2]. Метою змішування є виготовлення однорідної композиції вхідних компонентів із відсотковим складом, що відповідає заданій рецептурі. В ідеальному випадку такі процеси мають відбуватись швидко із мінімальними механічним впливом на матеріал та енерговикористанням. На практиці уникнути витрат енергії складно, оскільки змішування за своєю природою передбачає створення примусового взаємного руху частинок сипких матеріалів.

У промислових змішувачах переміщення частинок забезпечується за рахунок механічного впливу на них робочих органів. Цей процес потребує витрат енергії, кількість якої залежить як від продуктивності змішувача, так і від його конструкції. За принципом дії змішувачі поділяють на обладнання періодичної та безперервної дії [4].

Процес змішування у обладнанні періодичної дії складається з трьох основних етапів:

- завантаження компонентів суміші у робочу ємність змішувача;
- механічне перемішування;
- вивантаження готової суміші.

З точки зору використання енергії найбільш витратним є етап механічного змішування.

Постановка завдання. Основним завданням дослідження є аналіз витрат енергії у змішувачах періодичної та безперервної дії. Для визначення кількісного значення енерговитрат необхідно проаналізувати характер взаємодії робочих органів обладнання із сипким матеріалом та розрахувати механічні навантаження на електропривод.

Результати та їх обговорення. Розглянемо принцип дії змішувачів періодичної дії на прикладі стрічкового змішувача, який на теперішній час є одним з найбільш розповсюджених [2]. Схема змішувача показана на рис.1.

Вихідні компоненти суміші завантажуються у робочу ємність 1 через патрубки 2. Всередині робочої ємності знаходиться вал 3 із внутрішньою 4 та зовнішньою спіральними стрічками, які закріплені на ньому. Під час процесу змішування вал обертається із постійною швидкістю. Спіральні стрічки захоплюють матеріал та переміщують його. При цьому зовнішня стрічка переміщує матеріал в центральну частину робочої ємності, а внутрішня – у бік торців. В результаті всередині змішувача утворюються різноспрямовані потоки матеріалу, що забезпечують перемішування компонентів. Після завершення процесу змішування, готова суміш вивантажується через вихідний патрубок 6.

Дослідження та розрахунок енергетичних параметрів змішувача стрічкового типу представлені у роботі [1]. Під час процесу змішування енергія витрачається на подолання сил тертя матеріалу о внутрішню поверхню змішувача, о гвинтову поверхню стрічки та на переміщення матеріалу вздовж вісі гвинта. У дослідженні [1] показано, що при продуктивності стрічкового змішувача, що дорівнює $Q_C = 4000$ кг/год. потужність приводу має бути не менше $P_C = 9,7$ кВт.

У змішувачах безперервної дії вихідні компоненти подаються всередину змішувача безперервним потоком, тобто одночасно змішується порівняно невеликий об'єм матеріалу [4, 5]. Конструкція відцентрового змішувача безперервної дії [6, 9] показана на рис.2.

Змішування компонентів відбувається за рахунок взаємного перетинання розріджених потоків частинок [7]. Частинки сипких матеріалів подаються за допомогою живильників у вхідний патрубок 1 змішувача та під дією сили тяжіння падають на дно ротора 2, який обертається із постійною кутовою швидкістю ω .

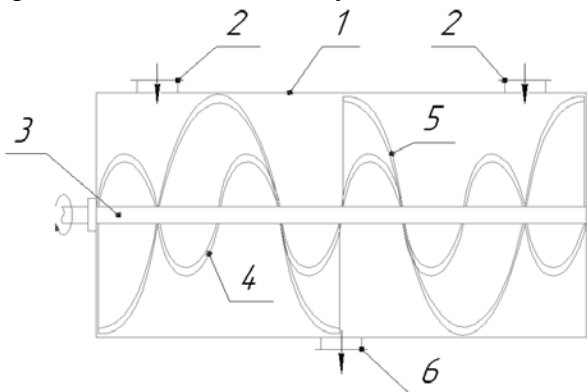


Рис.1. Схема стрічкового змішувача періодичної дії

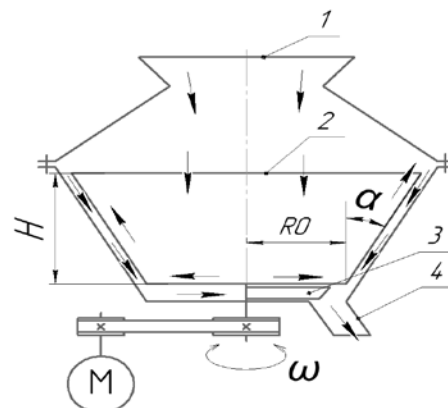


Рис.2. Схема відцентрового змішувача безперервної дії

Під дією відцентрової сили частинки починають рухатися вздовж бічної стінки ротора (напрямок руху показано стрілками). Після виходу із ротора сипкий матеріал за допомогою ножа 3 подається до вихідного патрубку 4. Траєкторії руху частинок є спіральними лініями [2], форма яких залежить від початкової швидкості частинок, їх початкового положення та параметрів матеріалу (коефіцієнту тертя між ротором та частинкою). В результаті траєкторії частинок різних компонентів перетинаються, що забезпечує ефект змішування.

Продуктивність відцентрового змішувача безперервної дії визначається об'ємом ротора та тривалістю перебування частинок в ньому. Для утворення розріджених потоків суміші необхідно уникати розташування частинок в декілька шарів. Враховуючи, що на початку процесу змішування всі частинки потрапляють на дно ротора, визначимо максимально можливу кількість частинок, що може бути розташована на дні ротора в один шар. Приймемо, що всі частинки є ідеальними сферами однакового розміру із радіусом r . Максимальна кількість кіл, яке можна розташувати всередині більшого кола R_0 , залежить від їх пакування. Відомо [3], що максимально можливе співвідношення сумарної площини маленьких кіл до площини кола, всередині якого вони знаходяться, не перевищує

$$\frac{S_{\Sigma}}{S_0} \leq \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \approx 0,74048. \text{ Це співвідношення дозволяє визначити максимальну кількість}$$

частинок, яку можна розташувати на дні ротора в один шар.

Для порівняння енергетичних характеристик стрічкового змішувача періодичної дії та відцентрового змішувача безперервної дії визначимо геометричні розміри та швидкість обертання ротора. Для ротора із кутом нахилу бічної стінки α та при коефіцієнті тертя f час перебування частинок всередині ротора становить t_3 с. Відповідно, кількість частинок, що мають одночасно знаходитись всередині змішувача для забезпечення заданої продуктивності становить:

$$n = \frac{Q_c}{m_{\text{ч}}} t_3, \quad (1)$$

де $m_{\text{ч}}$ – маса однієї частинки.

Траєкторія руху частинок всередині ротору визначається наступною системою рівнянь [3, 10]:

$$\begin{aligned} z_r'' - z_r \omega^2 \sin \alpha \cdot (\sin \alpha - f \cos \alpha) = \\ = g \sin \alpha (\sin \alpha - f \cos \alpha) + R_0 \omega^2 \cos \alpha \cdot (\sin \alpha - f \cos \alpha) - g \end{aligned} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= f(x, y, z) \cdot \cos \omega t \\ y &= f(x, y, z) \cdot \sin \omega t \\ z &= z_r \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де x, y, z – координати частинки у нерухомій системі координат (вісь z співпадає із віссю обертання ротора); z_r – координати частинки відносно рухомої системи координат, що обертається із кутовою швидкістю ω ; $f(x, y, z)$ – рівняння бічної поверхні ротора.

Розв'язок рівнянь (2) та (3) відносно t дозволяє визначити час, протягом якого частинка рухається від дна ротора вздовж бічної стінки до його верхньої кромки вздовж бічної стінки.

Мінімальна площа основи ротора, яка дозволяє розташувати n сферичних частинок радіусом r , визначається за формулою:

$$S_p \geq \frac{n \cdot \pi \cdot r^2}{0,74048}. \quad (5)$$

В результаті проведених розрахунків за співвідношеннями (1)-(5) визначено параметри ротора відцентрового змішувача безперервної дії, що забезпечує продуктивність $P_B = 4000$ кг/год. Значення цих параметрів становлять: висота ротора $H = 0,18$ м, радіус основи $R_0 = 0,137$ м, кут нахилу бічної стінки $\alpha = 35^\circ$; швидкість обертання $\omega = 52,36$ рад/с⁻¹. Прийmemo, що ротор виготовлений з товщиною стінок $h = 0,002$ м зі сталі густиною $\rho = 7820$ кг/м³. Тоді момент інерції відносно вісі обертання z дорівнюватиме $J_z = 0,151$ кг·м².

Найбільш енерговитратним режимом роботи ротора відцентрового змішувача безперервної дії є розганяння із нерухомого положення до заданої швидкості обертання ω [8]. Динамічний момент, що має розвивати електропривод, в такому режимі визначається за рівнянням:

$$M_\delta = J_z \frac{d\omega}{dt}. \quad (6)$$

Відповідно, максимальна потужність, що споживається приводом, становитиме:

$$P_{\max} = \frac{M_\delta \omega}{\eta_{pn} \eta_\delta}, \quad (7)$$

де η_{pn} – ККД пасової передачі, η_δ – ККД двигуна.

За результатами розрахунків визначено, що максимальна потужність запропонованої конструкції змішувача безперервної дії становить $P_B = 989$ Вт, що у 9,8 рази менше потужності змішувача періодичної дії P_C .

Висновки:

- 1) Запропоновані у роботі математичні моделі дозволяють визначити енергоспоживання відцентрового змішувача безперервної дії за певною продуктивністю.
- 2) Відцентровий змішувач безперервної дії споживає у 9,8 разів менше електричної енергії ніж стрічковий змішувач за умов рівної продуктивності.
- 3) Більш висока енергоефективність змішувачів безперервної дії зумовлена тим, що робочі органи взаємодіють із значно меншим об'ємом матеріалу.

Література

1 Савиных П. А. Обоснование конструкционно-технологических параметров ленточного смесителя. / П. А. Савиных, Н. В. Турубанов, Д. А. Зырянов // Вестник ВНИИМЖ. – №3(19). – 2015. – С.76-80.

References

1 Savynykh P. A., Turubanov N. V., Zyrianov D. A. (2015). Obosnovanye konstruktzyonno-tekhnolohycheskykh parametrov lentochnoho smesytelia [Justification of the tape mixer design and technological parameters] – Vestnyk VNYIMZh, №3(19), 76-80 [in Russian].

- 2 Стаценко В. В. Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів: монографія / В. В. Стаценко, О. П. Бурмістенков, Т. Я. Біла. — Київ : КНУТД, 2017. — 220 с.
- 3 Слоэн Н. Дж. А. Упаковка шаров / Н. Дж. А. Слоэн // В мире науки. — 1984. — №3. — С. 72-82.
- 4 Бурмістенков О. П. Основні напрямки автоматизації змішувальних комплексів безперервної дії для сипких матеріалів / О. П. Бурмістенков, Т. Я. Біла, В. В. Стаценко. // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2017. — № 6. — С.28-31.
- 5 Бакин И. А. Комплексное моделирование процессов непрерывного смешивания / И. А. Бакин, А. И. Саблинский, Г. Н. Белоусов // Технология и техника пищевых производств. Сборник научных работ. — Кемерово: КемТИПП, 2003. — С. 137-141.
- 6 Біла, Т. Я. Визначення оптимальних параметрів відцентрового змішувача безперервної дії / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2016. — № 4 (239). — С. 25-27.
- 7 Зайцев А. И. Современные конструкции и основы расчета смесительных аппаратов с тонкослойным движением сыпучих материалов / А. И. Зайцев, Д. О. Бытев, В. А. Северцев и др. // Обзорная информация. Серия: Хим-фарм. пром. — М : Изд-во. ЦБНТИ Мед. пром., 1984. — 23 с.
- 8 Біла Т. Я. Моделювання динамічних навантажень в змішувальних комплексах безперервної дії / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко // Вісник КНУТД. — 2015. — №4, С.24-29.
- 9 Бурмістенков А. П., Белая Т. Я., Корзун В. В., Слижевский В. А., винахідники. Смеситель непрерывного
- 2 Statsenko V. V., Burmistenkov O. P., Bila T. Ya. (2017). Avtomatyzovani kompleksi bezperervnoho pryhotuvannia kompozytsii sypkykh materialiv: monohrafiia [Automated complexes for bulk material compositions continuous preparation]. Kyiv : KNUTD [in Ukrainian].
- 3 Sloen N. Dzh. A. (1984). Upakovka sharov [Ball Packing] V myre nauky, 3, 72-82 [in Russian].
- 4 Burmistenkov O. P., Bila T. Ya., Statsenko V. V. (2017). Osnovni napriamky avtomatyzatsii zmishuvalnykh kompleksiv bezperervnoi dii dlia sypkykh materialiv [The main automation directions of continuous action mixing complexes for bulk materials] Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Tekhnichni nauky, 6, 28-31 [in Ukrainian].
- 5 Bakyn Y. A., Sablynskyi A. Y., Belousov H. N. (2003). Kompleksnoe modelyrovanye protsessov nepreryvnoho smesepryhotovleniya [Comprehensive continuous mixing processes simulation] — Tekhnolohyia y tekhnika pyshevykh proyzvodstv. Sbornyk nauchnykh rabot, Kemerovo: KemTYPP, 137-141 [in Russian].
- 6 Bila T. Ya., Statsenko V. V. (2016). Vyznachennia optymalnykh parametriv vidtsentrovoho zmishuvacha bezperervnoi dii [Optimum parameters determination in centrifugal mixers of continuous action] — Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Tekhnichni nauky, № 4 (239), 25-27 [in Ukrainian].
- 7 Zaitsev A. Y., Bytev D. O., Severtsev V. A. i dr. (1984) Sovremennye konstruktsyy y osnovy rascheta smesytelnykh apparatov s tonkosloinym dvyzhenyem sypchyykh materyalov [Modern designs and calculation fundamentals of mixing apparatus with a thin-layer bulk materials movement] — Obzornaia ynformatsyia. Seryia: Khym-farm. prom. — M : Yzd-vo. TsBNTY Med. prom., 23p. [in Russian].
- 8 Bila T. Ya., Statsenko V. V. (2015). Modeliuvannia dynamichnykh navantazhen v zmishuvalnykh kompleksakh bezperervnoi dii [Dynamic loads simulation in mixing complexes of continuous action] — Visnyk KNUTD, №4, 24-29 [in Ukrainian].
- 9 Burmystenkov A. P., Belaia T. Ya., Korzun V. V., Slyzhevskiy V. A. (1985). Smesytel nepreryvnoho deistviya [Continuous mixer]: A. s. USSR no.1165446.
- 10 Bila T. Ya., Statsenko V. V. (2012).

действия: А. с. СССР № 1165446, 1985.
10 Біла Т. Я. Дослідження руху
частинок суміші у ступінчастому роторі
відцентрового змішувача безперервної
дії / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко // Вісник
КНУТД. – 2012. – №6, С.17-21.

Doslidzhennia rukhu chastynok sumishi u
stupinchastomu rotori vidtsentrovoho zmishuvacha
bezperervnoi dii [The investigation of loose materials
particles movements in continuous action centrifugal
mixers stepped rotor] – Visnyk KNUTD, №6, 17-21
[in Ukrainian].

BURMISTENKOV OLEKSANDR

ResearcherID: T-5180-2018

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0001-4229>

Kyiv National University of Technologies & Design

BILA TETYANA

ResearcherID: T-5276-2018

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8937-5244>

Kyiv National University of Technologies & Design

STATSENKO VOLODYMYR

ResearcherID: C-3646-2017

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3932-792X>

Kyiv National University of Technologies & Design

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ БУРМИСТЕНКОВ А. П., БЕЛАЯ Т. Я., СТАЦЕНКО В. В.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Определение энергетических параметров оборудования для смешивания сыпучих материалов.

Методика. В работе использованы методы математического моделирования, сравнительного анализа и исследования электропривода. Исследование движения частиц внутри смесителя проведено на основе законов теоретической механики.

Результаты. Рассмотрены особенности конструкции смесителей сыпучих материалов непрерывного и периодического действия. Показаны принцип действия и энергопотребление ленточного смесителя периодического действия с производительностью 4000 кг/час. Представлены конструкция и принцип работы центробежного смесителя непрерывного действия. Приведена математическая модель движения частиц внутри центробежного смесителя непрерывного действия. Выполнен анализ взаимного расположения частиц сыпучего материала внутри ротора и определены условия, при которых обеспечивается качественный процесс смешивания. Предложены математические модели, позволяющие определить конструктивные и технологические параметры оборудования исходя из заданной производительности. Определены режимы работы, при которых центробежный смеситель потребляет максимальное количество энергии. Предложен алгоритм определения мощности электропривода центробежного смесителя непрерывного действия. Представлены результаты сравнительного анализа энергопотребления смесителей непрерывного и периодического действия, имеющих одинаковую производительность. Проведено исследование режимов работы и факторов, влияющих на энергопотребление.

Научная новизна. Получены математические модели, позволяющие определить взаимосвязь между производительностью центробежного смесителя непрерывного действия, его режимами работы и энергопотреблением.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют осуществлять обоснованный выбор оборудования для смешивания сыпучих материалов.

Ключевые слова: смеситель, сыпучий материал, ленточный смеситель, центробежный смеситель, энергопотребление, моделирование.

THE RESEARCH OF ENERGY EFFICIENCY FOR MIXING BULK MATERIALS EQUIPMENT

BURMISTENKOV O. P., BILA T. Y., STATSENKO V. V.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. *The energy parameters determination of bulk materials mixing equipment.*

Methodology. *The paper used methods of mathematical modeling, comparative analysis and research of electric drive. The particles motion study inside the mixer was performed on the theoretical mechanics laws basis.*

Findings. *Design features of continuous and batch bulk materials mixers are considered. The operation principle and energy consumption are shown for a periodic action tape mixer with a productivity of 4000 kg / h. The continuous centrifugal mixer design and operation principle are presented. A particle motion mathematical model inside a continuous centrifugal mixer is presented. The mutual arrangement analysis of the bulk material particles inside the rotor was carried out and the conditions are determined under which a high-quality mixing process is ensured. Mathematical models are proposed to determine equipment design and technological parameters based on a given performance. Operation modes are determined in which the centrifugal mixer consumes the maximum energy amount. An algorithm for determining the continuous electric centrifugal mixer power is proposed. The comparative analysis results of the continuous and batch mixers energy consumption with the same performance are presented. A study of operating modes and factors affecting energy consumption was carried out.*

Originality. *Mathematical models are obtained that allows determining the relationship between a continuous centrifugal mixer performance, its operating modes, and power consumption.*

Practical value. *The obtained results permits to make an informed choice of equipment for mixing bulk materials.*

Keywords: *mixer, bulk material, belt mixer, centrifugal mixer, power consumption, modeling.*

УДК 621. 317

¹СМОЛЯНИНОВ В. Г., ²СУХОПАРА О. М.

¹Київський національний університет технологій та дизайну

²НВП ТОВ «МТІ», м. Київ, Україна

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ ЛІНІЙНИМ КРОКОВИМ ПРИБРОЕМ

Мета. Аналіз відомих підходів та виявлення особливостей зміни електричних параметрів при пересуванні рухомої ланки лінійних крокових пристроїв та побудова енергоефективного керування, що контролює ці зміни, для підвищення ефективності їх функціонування.

Методика. При дослідженні використовувались теорії електричних ланцюгів та електронних схем, неперервне перетворення Лапласу, що враховує зміну електричних параметрів при пересуванні рухомої ланки лінійного крокового пристрою.

Результати. За результатами проведеного аналізу знайдена залежність часових інтервалів та зміни форми струму в обмотці лінійного крокового пристрою від положення рухомої ланки. Визначені інтервали розподілення спожитої енергії для здійснення пересування рухомої ланки на довжину кроку. Розглянута організація керування лінійним кроковим пристроєм без використання додаткових датчиків контролю за пересуванням рухомої ланки при енергоефективному керуванні лінійним кроковим пристроєм.

Наукова новизна. Визначені та проаналізовані часові інтервали при пересуванні рухомої ланки лінійного крокового пристрою, їх залежність від форми струму в обмотці лінійного крокового пристрою, знайдені аналітичні вирази для їх розрахунку. Можливість організації роботи лінійного крокового пристрою, здійснюючи керування рухомою ланкою за формою струму в обмотці без додаткових датчиків, дозволяє реалізувати ефективне перетворення, передачу та розподілення енергії в системі енергоефективного керування лінійним кроковим пристроєм.

Практична значимість. Результати дослідження можуть бути використані при створенні нових способів керування, що контролюють форму струму в обмотках лінійних крокових пристроїв без використання додаткових датчиків положення, пересування та швидкості, та нових схемотехнічних рішень засобів енергоефективного керування для їх реалізації.

Ключові слова: лінійний кроковий пристрій, форма струму, часові інтервали, енергоефективне керування.

Вступ. Використання лінійних крокових пристроїв (ЛКП), що є виконуючими елементами електроприводу з лінійним покрововим пересуванням рухомої ланки (РЛ), потребують створення нових ефективних засобів керування ними. Існує велика кількість різноманітних схем та засобів керування ЛКП, але недостатньо розглянуті питання керування ними з урахуванням електромагнітних процесів, що відбуваються в них при значному взаємному впливі електричних та механічних частин одна на одну, при достатньо великих індуктивностях та постійних часу обмоток, нелінійному характеру електромагнітних параметрів ЛКП та пов'язані з цим задачі зменшення енергоспоживання, підвищення надійності та адаптивності роботи ЛКП, потребує додаткових досліджень та розробки нових засобів енергоефективного керування та схемотехнічних рішень для їх реалізації, є актуальним науково-технічним завданням.

Аналіз попередніх досліджень. Розвиток та використання ЛКП в якості промислових роботів, маніпуляторів та різних автоматизованих пристроїв, побудованих на базі електромагнітного приводу лінійного пересування [1-7], дозволяє значно спростити механічну частину автоматизованих систем, підвищити надійність та забезпечити

функціональні можливості виконавчої частини системи за рахунок безпосереднього, без перетворювання інформації, використання сигналів, що надходять із блоку програмного курування (БПК).

БПК слугує для автоматичної підтримки заданого режиму роботи виконуючого органу (ВО). Він включає в себе програмний керуючий модуль на базі мікро або міні ЕОМ, перетворювача вхідної інформації для узгодження параметрів програмного пристрою з напівпровідниковим перетворювачем енергії, що формує відповідні рівні живлення ВО. Одночасно він вирішує задачі підвищення якості пересування ВО за допомогою формування потрібних законів керування. Однією із задач, що вирішує БПК, є забезпечення рівномірної послідовності керуючих імпульсів. Для підвищення надійності роботи ВО, підвищення якості руху та швидкодії системи між БПК та ВО використовують елементи зворотного зв'язку, блок датчиків (БД), в якості яких зазвичай використовують датчики пересування, положення або швидкості.

Найбільш широке застосування знайшли датчики положення [3, 7], які розділяють по числу каналів на одно - та багатоканальні; по принципу дії - на потенціометричні фотоелектричні та електромагнітні; по виду вихідної інформації - на імпульсні та потенціометричні. Імпульсний датчик подає інформацію як унітарний код, кількість імпульсів в яких відповідає кількості відпрацьованих кроків. Потенціометричні датчики видають інформацію у вигляді постійних сигналів які співпадають з періодами відпрацьованих кроків. Фотоелектричні датчики, встановлюють на волю двигуна як диск з перерізами або отворами кількість яких співпадає з кількістю кроків двигуна.

Електромагнітні датчики, це багатоканальні датчики з пасивним рухомим елементом. При пересуванні якоря в обмотках датчика відбувається модуляція змінного магнітного потоку яка використовується для формування інформаційних імпульсів про місцезнаходження якоря. Також в якості датчика положення можна використати спеціальні або власні обмотки ЛКП.

Таким чином, аналіз літературних джерел показав, що для реалізації енергоефективного керування з використанням датчиків зворотного зв'язку, найбільш перспективним в плані отримання інформації о пересуванні рухомої ланки ЛКП є використання сигналів, що знімаються з власних обмоток ЛКП.

Постановка завдання. В наш час ЛКП з покровим пересуванням якоря та пристроями для їх керування, знайшли широке використання в якості промислових роботів та маніпуляторів, транспортних системах, вібротехнологічних установках та т. і., тому вирішення питання підвищення надійності та адаптивності роботи такого обладнання до зміни механічного навантаження при спрощенні системи керування ними з одночасним зменшенням енергоспоживання під час його роботи, є однією з важливих задач при проектуванні таких систем. Метою даної роботи є дослідження та розробка енергоефективного керування лінійними кроковими пристроями, що розглядаються в якості активно - індуктивного навантаження, в яких аналізується форма струму, що знімається з власних обмоток ЛКП при покровому пересуванні рухомої ланки, та визначаються часові інтервали таких змін, що використовуються для формування імпульсів керування РЛ ЛКП.

Результати дослідження. З великої кількості механізмів, що використовують для створення обертового моменту або синхронізуючого зусилля під дією струму та магнітного

поля та які можна розділити [1, 3]: а) пристрої у яких взаємодіють постійні магніти та провідники зі струмом (магнітоелектричні); б) пристрої у яких частини з магнітом'якого матеріалу втягуються в котушки зі струмом (електромагнітні); в) пристрої у яких взаємодіють котушки зі струмом, будемо розглядати тільки електромагнітні пристрої лінійного пересування принцип дії яких базується на дискретній зміні стану електромагнітного поля в робочому зазорі за рахунок імпульсного збудження або перемикання обмоток при пересуванні рухомої ланки на довжину кроку.

В залежності від виду керування та використаних ключових елементів існує великий вибір схем керування, що працюють на нелінійне активно - індуктивне навантаження якими є обмотки ЛКП. Незалежно від типу ключового елемента [8] та роду живлячої напруги [9], схеми керування ЛКП можна розділити на реверсивні, струм навантаження яких протікає в обох напрямках та нереверсивні які забезпечують в навантаженні пульсуючий струм одного напрямку [10].

Основним типом перетворювача, що використовується для живлення та керування ЛКП є нереверсивний перетворювач кожний канал якого є послідовним з'єднанням ключового елемента та обмотки ЛКП.

Структура ЛКП, розглядається як пристрій циліндричної форми з рухомою ланкою, яка набрана з феромагнітних елементів, що розділені немагнітними вставками. Зовнішній магнітопровід виконує роль статора, що складається із секцій з кільцевими магнітними полюсами в яких розміщені обмотки збудження. Полюси своїми наконечниками повернуті у бік рухомої ланки. Немагнітні вставки розділяють феромагнітні елементи таким чином, що останні зміщені відносно секцій статора на величину яка відповідає лінійному кроку пересування рухомої ланки. Полюсний поділ секції статора дорівнює довжині феромагнітного елемента, який займає всю її довжину в положенні магнітної рівноваги.

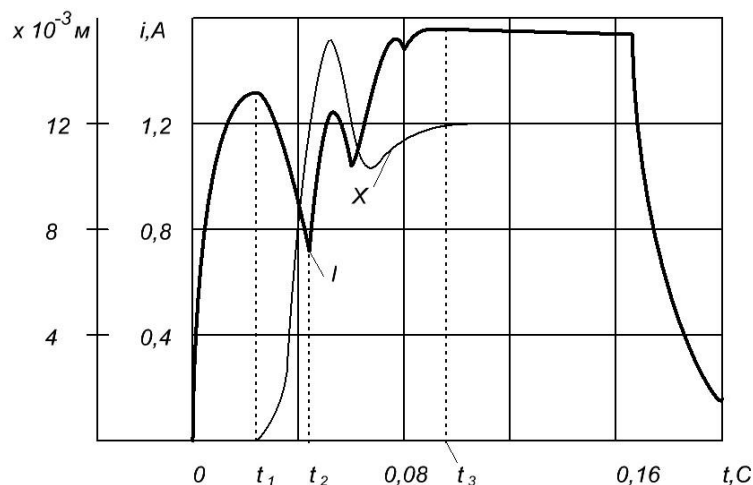


Рис.1. Форма струму в обмотці ЛКП

Реалізувати енергоефективне керування з контролем переміщення та швидкості РЛ ЛКП можливо в системі локально - замкнутого приводу, використовуючи сигнали відповідних датчиків для комутації обмоток ЛКП. Використання датчиків призводить до

ускладнення конструкції привода, збільшенню приєднаної маси рухомої частини, що погіршує динамічні та енергетичні показники привода в цілому. Іноді для комутації обмоток ЛКП використовують електрорушійну силу (ЕРС), наведену в допоміжних обмотка при пересуванні РЛ ЛКП, кількість яких дорівнює кількості основних обмоток ЛКП. В замкнутих системах керування для комутації обмоток ЛКП використовують датчики струму які включені в ланцюги обмоток ЛКП [7]. При цьому комутація обмоток відбувається коли струм досягає сталого значення, якір вже відпрацював крок та зайняв положення магнітної рівноваги. Надлишкова енергія, що продовжує надходити в обмотку призводить як до її марних втрат так і нагріву конструкції ЛКП.

Аналіз проведений для швидкодіючих електромагнітів та крокових двигунів [4, 6, 7] з рухомою ланкою із феромагнітного матеріалу, свідчить, що під дією електромагнітних сил відбувається зміна індуктивного опору на кроці пресування, а відповідно і повного опору обмотки, що відображається у зміні форми струму в обмотках. Таким чином струм в обмотках можна використати в якості функції керування, яку формує сам ЛКП, що відображає електромагнітні процеси у його внутрішній структурі при пересуванні рухомої ланки. При дослідженні форми та часових інтервалів осцилограми струму в обмотці – $I(i_{\text{вкл}}(t))$ та відповідно знятої, осцилограми пересування рухомої ланки – X , на рис.1, можна визначити, що на інтервалі від $0 - t_1$ зростає струм у включеній обмотці але ланка не рухається, потужність джерела живлення йде на накопичення електромагнітної енергії для початку її пересування. На інтервалі від t_1 до t_2 здійснюється пересування рухомої ланки, потужність джерела живлення перетворюється в механічну енергію. Після часу спрацювання t_2 , що дорівнює часу зрушення t_1 та часу пересування t_d , рухома ланка досягає положення магнітної рівноваги, струм в обмотці починає зростати і до часу t_3 досягає сталого значення. На інтервалі від t_2 до t_3 , коли пересування скінчилося, спожита потужність витрачається тільки на нагрів структури ЛКП та повністю перетворюється в потужність втрат. Для енергоефективного функціонування ЛКП потрібно значно зменшити або скоротити часовий інтервал $t_2 - t_3$, а також інтервал t_1 . Ефективність функціонування підвищується при зменшенні інтервалу t_1 , за допомогою ланцюгів форсування струму [10] у включеній обмотці ЛКП, а інтервал $t_2 - t_3$ зменшується, коли довжина імпульсів керування формується відповідно до зміни форми струму в обмотках ЛКП і відключення відбувається або в час t_2 або після часу t_2 з невеликою затримкою для надійного спрацювання ЛКП.

Розглянемо форму струму в обмотці ЛКП на рис. 1, та визначимо часові інтервали, які характеризують її зміни. До моменту часу t_1 , струм змінюється по експоненційному закону з постійною часу $\tau_n = L_{\text{min}} / R_n$, де L_{min} - індуктивність обмотки перед спрацюванням рухомої ланки; R_n - активний опір обмотки. Повний опір ланцюга навантаження в операторній формі: $Z_n(p) = R_n + pL_{\text{min}}$. При нульових початкових умовах, використаємо безперервне перетворення Лапласа та визначимо перехідний струм на інтервалі $0 - t_1$: $i(t) = \text{Res} \frac{U}{p(R_n + pL_{\text{min}})} e^{p_1 t_1} + \text{Res} \frac{U}{p(R_n + pL_{\text{min}})} e^{p_2 t_1}$, де $p_1 = 0$ та $p_2 = -R_n / L_{\text{min}}$ - корені характеристичного рівняння навантаження, за умови $Z_n(p) = 0$; U - напруга джерела живлення постійного струму. Рішення рівняння, після диференціювання та відповідних

математичних перетворень, прийме вигляд: $i(t) = \frac{U}{R_H} (1 - e^{-\frac{R_H}{L_{min}} t})$, звідки час зрушення $t_1 = \frac{L_{min}}{R_H} \ln \frac{I_H}{I_H - i(t)}$, де $I_H = U/R_H$ – сталих значення струму навантаження.

На кривій струму - I , рис. 1, в час t_1 , струм досягає значення $i(t_1)$, при якому сила тяжіння долає момент опору та рухома ланка ЛКП починає пересуватися. Рівняння балансу сил для ЛКП, дорівнює $F_{EM} = m \frac{d^2x}{dt^2} + F_{np}(x, \frac{dx}{dt})$, де $m = m_{р.л} + m_{np}$ - маса рухомої ланки ЛКП та приєднаного навантаження; F_{EM} – тягова сила; $F_{np}(x, \frac{dx}{dt})$ – протидіюча сила, залежна, як від положення, так і від швидкості рухомої ланки. В мить зрушення рухомої ланки має місце рівняння $d^2x/dt^2 = 0$, що відповідає рівнянню сил $F_{EM} = F_{np}$, тоді зусилля, що створює ЛКП: $F_{EM} = (iw)^2 \frac{dG_m}{2dx} = \frac{\Phi^2 dG_m}{2G_m^2 dx}$, де G_m – магнітна провідність ланцюга рухомої ланки; x – довжина пересування рухомої ланки; w – кількість витків обмотки ЛКП, Φ - магнітний потік.

Враховуючи, що в мить зрушення t_1 , тягова та протидіюча сили рівні, струм в момент зрушення рухомої ланки $i(t_1) = \frac{\Psi}{L_{min}} = \frac{\Phi w}{L_{min}} = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{2F_{np} dx}{dG_m}}$, звідки час зрушення: $t_1 = \frac{L_{min}}{R_H} \ln \frac{1}{1 - i(t_1)/I_H} = \frac{w^2 G_m}{R_H} \ln \frac{1}{1 - \frac{R_H}{wU} \sqrt{\frac{2F_{np} dx}{dG_m}}}$. З часу t_1 до часу t_2 , відбувається пересування рухомої ланки (x - рис. 1). Для визначення часу пересування t_d використаємо рівняння балансу напруг $\frac{d\Phi}{dt} = \frac{U}{w} - \frac{iR_H}{w} = \frac{U}{w} - \frac{\Phi R_H}{L_{max}}$, та балансу сил $\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_{EM}}{m} - \frac{F_{np}}{m} = \frac{dG_m}{2mG_m^2 dx} \Phi^2 - \frac{F_{np}}{m}$. Приблизне аналітичне рішення можливо отримати, якщо диференційні рівняння подати ступеневим рядом, що сходиться [6]. Враховуючи, що в час t_1 пересування та швидкість рухомої ланки дорівнює нулю, рівняння руху можливо апроксимувати ступеневою функцією, параболою k – порядку: $x = a \cdot t^k$, де a - коефіцієнт пропорційності. З аналізу кривих пересування рухомої ланки ЛКП [6, 7] можна визначити, що $k = 3$. Для визначення коефіцієнта a візьмемо другу похідну від рівняння руху РЛ ЛКП та підставимо рівняння потоку в рівняння балансу сил. Після відповідних математичних перетворень знайдемо час пересування:

$$t_d = \sqrt[3]{\frac{x}{a}} = \sqrt[3]{\frac{3 m w x G_m}{U \sqrt{\frac{F_{np} dG_m}{2dx} - \frac{R_H F_{np}}{w}}}}$$

Для перевірки отриманих виразів часу зрушення t_1 , часу пересування t_d , та часу спрацювання $t_2 = t_1 + t_d$ були зроблені розрахунки та отримані експериментальні дані які обирались у відповідності до параметрів ЛКП [11] з якого знімались характеристики, з величиною напруги живлення $U=40$ в: $t_{1розр.,сек} = 0,0815$, $t_{1експ.,сек} = 0,083$; $t_{d,розр.,сек} = 0,0774$, $t_{d,експ.,сек} = 0,076$; $t_{2розр.,сек} = 0,1589$, $t_{2експ.,сек} = 0,159$. Середня похибка для розрахункових та вимірних значень не перевищує 10%, яку можна пояснити наявністю втрат в електромагнітному ланцюзі навантаження та додатковим механічним опором рухомої ланки ЛКП.

При аналізі енергетичних характеристик на часових інтервалах, що характеризують пересування РЛ ЛКП, потужність джерела живлення використовується, як на створення тягового зусилля і гальмування РЛ ЛКП, так і на нагрів ЛКП в кінці робочого ходу рухомої ланки. На рис. 1, інтервал часу $0 - t_1$ характеризує енергію, необхідну для подолання сил тертя і протидіючих сил інерції РЛ ЛКП та приєднаної до неї маси. З моменту часу t_1 енергія, що надходить до обмоток ЛКП, використовується безпосередньо на пересування РЛ ЛКП та приєднаної до неї маси, виконуючи корисну роботу. На інтервалі часу з t_2 до t_3 енергії, що надходить в більшій мірі використовується на створення гальмівних зусиль, спрямованих на зменшенню кінетичної енергії РЛ ЛКП. Після часу t_3 вся підведена енергія практично витрачається на нагрів ЛКП. Енергоефективне керування забезпечується при комутації обмоток в час t_2 , коли рухома ланка досягла положення магнітної рівноваги в секції включеної обмотки ЛКП. Для зменшення інтервалу $0 - t_1$ застосовують ланцюги форсування струму [10], при використанні, як додаткових джерела енергії, так і рекуперації енергії, що накопичується власно в структурі ЛКП, що підвищує коефіцієнт корисної дії (ККД) електроприводу в цілому.

Для реалізації енергоефективного керування з вибором в якості функції керування зміни форми струму в обмотці ЛКП, з точки зору підвищення надійності та адаптивності роботи, при зміні механічного навантаження та зменшенні споживання енергії, необхідно використати систему керування, яка здатна відслідковувати зміни струму, при пересуванні рухомої ланки, та формувати імпульси керування ЛКП. Для роботи такої системи керування не потрібні громіздкі датчики положення, пересування та швидкості, які потребують складної конструктивно - технологічної реалізації та власної системи керування.

Висновки. Проведений у статті аналіз показав, що струм в обмотці ЛКП можна використати в якості функції енергоефективного керування, який без додаткових датчиків, формує сам лінійний кроковий пристрій, що відображає електромагнітні процеси у його внутрішній структурі при пересуванні рухомої ланки.

Зроблений аналіз та отримані аналітичні вирази для розрахунку часових інтервалів зміни струму в обмотці ЛКП показує, що формування імпульсів напруги потрібної амплітуди та довжини на інтервалі часу зрушення t_1 , та пересування t_d ($t_2 = t_1 + t_d$), дозволяє організувати енергоефективне керування при максимумі швидкодії та мінімумі енергоспоживання.

Конструювання ЛКП з властивостями, що дозволяють організувати енергоефективне керування без додаткових датчиків, за рахунок контролю електромагнітних процесів у власній конструкції, є перспективним напрямком проведення розробок в межах більш широкого кола застосування, наприклад, в автоматизації технологічних процесів в легкій промисловості та робототехніці.

Література

1. Гнатів А. В. Теорія електроприводу транспортних засобів / А. В. Гнатів, Ш. В. Аргун, І. С. Трунова. - Харків: ХНАДУ, 2016. - 292 с.
2. Емельянов А. В. Шаговые двигатели / А. В. Емельянов, А. Н. Шилин. - Волгоград: ВолгГТУ, 2005. - 48 с.
3. Гумен В. Ф. Следящий шаговый электропривод / В. Ф. Гумен, Т. В. Калининская. - Л.: Энергия, 1980. - 168 с.
4. Коваленко М.А. Автономний експериментальний стенд для випробування уніполярного крокового двигуна на базі мікроконтролера / М. А. Коваленко, Д. С. Мацюк // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С.15-20.
5. Yeadon W. H., Yeadon A. W. Handbook of Small Electric Motors. McGraw - Hill, 2001. - 1185 s.
6. Тер – Акопов А. К. Динамика быстродействующих электромагнитов / А. К. Тер – Акопов. - М.; Л.: Энергия, 1965. - 168 с.
7. Электромагнитный привод робототехнических систем / [А.А. Афонин, Р.Р. Белозер, В.В. Гребеников и др.]. - Киев: Наук. думка, 1986. - 272 с.
8. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение / П. А. Воронин. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Издательский дом "Додэка - XXI", 2005. - 384 с.
9. Хрусталеv Д.А. Аккумуляторы / Д.А. Хрусталеv. - М.: Изумруд, 2003. - 224 с.
10. Леоненко Л.И. Полупроводниковые форсирующие схемы / Л.И. Леоненко. - М.: Энергия, 1974. - 96 с.
11. Смолянінов В. Г. Поліпшення функціонування виконуючих пристроїв радіоелектронних засобів / В. Г. Смолянінов, О. М. Сухопара // Вісник НТУУ "КПІ". Серія - Радіотехніка. Радіоапаратуробудування. - 2012. - Вип. 48. - С.140-148.

References

1. Gnatov A. V. Teoriya elektroprivodu transportnih zasobiv [Theory electric drive of transport] / A. V. Gnatov, Sh. V. Argun, I. S. Trunova. - Harkiv: HNADU, 2016. - 292 p. [in Ukrainian].
2. Emelyanov A.V. Shagovye dvigateli [Step engines] / A.V. Emelyanov, A.N. Shilin. - Volgograd: VolgGTU, 2005. - 48 p. [in Russian].
3. Gumen V.F. Sledyashij shagovyj elektroprivod [Tracking step-by-step electric drive] / V. F. Gumen, T. V. Kalininskaya. - L.: Energiya, 1980. - 168 p. [in Russian].
4. Kovalenko M.A. (2015). Avtonomnij eksperimentalnij stend dlya viprobuvannya unipolyarnogo krokovogo dviguna na bazi mikrokontrolera [The autonomous experimental stand for testing a unipolar stepper motor based on a microcontroller] / M. A. Kovalenko, D. S. Macyuk // Elektrotehnika ta elektroenergetika - Electrical engineering & electricity, 2, 15-20 [in Ukrainian].
5. Yeadon W. H., Yeadon A. W. Handbook of Small Electric Motors. McGraw - Hill, 2001. -1185 p.
6. Ter – Akopov A. K. Dinamika bystrodeystvuyushih elektromagnitov [Dynamics of fast-acting electromagnets] / A. K. Ter – Akopov. - M.; L.: Energiya, 1965. - 168 p. [in Russian].
7. Elektromagnitnyj privod robototekhnicheskikh sistem [Electromagnetic drive of robotic systems] / [A.A. Afonin, R.R. Belozher, V.V. Grebenikov i dr.]. - Kiev: Nauk. dumka, 1986. - 272 p. [in Russian].
8. Voronin P. A. Silovye poluprovodnikovye klyuchi: semejstva, karakteristiki, primenenie [Power semiconductor keys: families, characteristics, application] / P. A. Voronin. Izd. 2-e, pererab. i dop. - M: Izdatelskij dom "Dodeka - HHI", 2005. - 384 p. [in Russian].
9. Hrustalev D.A. Akkumulyatory [Batteries] / D.A. Hrustalev. - M.: Izumrud, 2003. - 224 p. [in Russian].
10. Leonenko L.I. Poluprovodnikovye forsirovushie shemy [Semiconductor boosting circuits] / L.I. Leonenko. - M.: Energiya, 1974. - 96 p. [in Russian].
11. Smolyaninov V.G., Suhopara O.M. (2012). Polipshennya funkcionuvannya vikonyuchih pristroyiv radioelektronnih zasobiv [Improving the functioning of radio electronics performing devices] / V.G. Smolyaninov, O.M., Suhopara // Visnik NTUU "Kiyivskij politehničnij institut". Seriya Radiotekhnika. Radioaparaturobuduвання - Visnyk NTUU "Kiev Polytechnic Institute". Series-Radio Engineering. Radio equipment, 48, 140-148 [in Ukrainian].

SMOLIANINOV V. G.

ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-1657-1479>

Kyiv National University of Technologies and Design

SUKHOPARA A. N.

SPE LTD «МТИ»Kyiv, Ukraine

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫМ ШАГОВЫМ
УСТРОЙСТВОМ

¹СМОЛЯНИНОВ В. Г., ²СУХОПАРА А. Н.

¹Киевский национальный университет технологий и дизайна

²НПП ООО "МТИ". Г. Киев, Украина

Цель. Анализ известных подходов и определение особенностей изменения электрических характеристик при движении подвижного звена линейного шагового устройства и построение

энергоэффективного управления, что контролируют эти изменения, для повышения эффективности их функционирования.

Методика. При исследовании использовались теории электрических цепей и электронных схем, непрерывное преобразование Лапласа, что учитывает изменение электрических параметров при перемещении подвижного звена линейного шагового устройства.

Результаты. По результатам проведенного анализа найдена зависимость временных интервалов и изменения формы тока в обмотке линейного шагового устройства от положения подвижного звена. Определены интервалы распределения потребляемой энергии для обеспечения перемещения подвижного звена на величину шага. Рассмотрена организация управления линейным шаговым устройством без использования дополнительных датчиков контроля за перемещением подвижного звена при энергоэффективном управлении линейным шаговым устройством.

Научная новизна. Определены и проанализированы временные интервалы при перемещении подвижного звена линейного шагового устройства, их зависимость от формы тока в обмотке, найдены аналитические выражения для их расчета. Возможность организации работы линейного шагового устройства, реализуя управление подвижным звеном по форме тока в обмотке без дополнительных датчиков, позволяет реализовать эффективное преобразование, передачу и распределение энергии в системе энергоэффективного управления линейным шаговым устройством.

Практическая значимость. Результаты исследования могут быть использованы при создании новых способов управления, что контролируют форму тока в обмотках линейного шагового устройства без использования дополнительных датчиков положения, перемещения и скорости, и новых схемотехнических решений средств энергоэффективного управления для их реализации.

Ключевые слова: линейное шаговое устройство, форма тока, временные интервал, энергоэффективное управление.

ENERGY EFFICIENT OPERATION OF THE LINEAR STEPPER DEVICE

¹SMOLIANINOV V. G., ²SUKHOPARA A. N.

¹Kyiv National University of Technologies and Design

²SPE LTD "MTI" Kyiv, Ukraine

Purpose. Analysis of known approaches and determination of the characteristics of changes in electrical characteristics during the movement of the mobile link of a linear stepper device and the construction of energy-efficient control that control these changes in order to increase the efficiency of their functioning.

Methodology. The theories of electrical circuits and electronic circuits, continuous transformation of Laplace, which takes into account the change in electrical parameters when moving the mobile link of the linear stepping device.

Findings. Based on the results of the analysis, it was found that time intervals and changes in the shape of the current in the winding of the linear step device were dependent on the position of the mobile link. The intervals of energy consumption are defined to ensure that the rolling link is moved by the size of the step. It is considered the organization of the control of a linear step device without the use of additional sensors to monitor the movement of the mobile link in the energy efficient control of the linear step device.

Originality. The main approaches to the time intervals for the movement of the mobile link of the linear step device, their dependence on the current form in the winding, found analytical expressions for their calculation have been defined and analyzed. The ability to organize the work of a linear step device, implementing the control of the mobile link in the form of current in the winding without additional sensors, allows to implement an effective conversion, transmission and distribution of energy in the system energy efficient control of a linear step device.

Practical value. The results of the research can be used for the creation of new methods that control the shape of the current in the windings of the linear step device without the use of additional sensors of position, movement and speed, and new schematic solutions of energy efficient control devices for their implementation.

Keywords: linear step device, current form, time interval, energy efficient control.

УДК 621.924.7

ЗАЛЮБОВСЬКИЙ М. Г.¹, ПАНАСЮК І. В.²,
МАЛИШЕВ В. В.¹

¹Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

²Київський національний університет технологій та дизайну

ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ВЕДУЧОГО ВАЛУ МАШИНИ ДЛЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ: ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД

Мета. Аналітичне дослідження процесу відділення металевих деталей замка «блискавка» в машині, робоча ємкість якої виконує складний просторовий рух, для визначення необхідної кутової швидкості ведучого валу машини.

Методика. Проведено аналітичне дослідження основних факторів, які впливають на реалізацію технологічного процесу відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників у галтувальних машинах, робочі ємкості яких виконують складний просторовий рух.

Результати. На основі проведеного аналітичного дослідження процесу відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників отримано математичні залежності, що дають можливість прогнозувати технологічний результат на стадії проектування. Аналітично встановлено, що при реалізації водоспадного режиму руху практично відсутня сила тертя робочого масиву по внутрішнім стінкам ємкості, що створює умови для підвищення інтенсивності виконання технологічного процесу. Відповідно при каскадному режимі руху інтенсивність відділення деталей від ливників буде значно меншою.

Наукова новизна. Встановлено взаємозв'язок між геометричними параметрами робочої ємкості, що виконує складний просторовий рух, кінцевою швидкістю переміщення робочого масиву в момент зіткнення з торцем ємкості та кутовою швидкістю ведучого валу машини, яка забезпечує інтенсивну реалізацію відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників.

Практична значимість. Отримані математичні залежності для розрахунку кутової швидкості ведучого валу машини зі складним рухом робочої ємкості для реалізації технологічного процесу відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників. Результати досліджень можуть бути використані підприємствами на стадії проектування відповідних технологічних процесів обробки металевих деталей з метою підвищення продуктивності виробництва та одночасного зменшення енерговитрат.

Ключові слова: відділення від ливників, замок «блискавка», металеві деталі, робоча ємкість.

Вступ. Формоутворення металевих деталей замка «блискавка» відбувається шляхом лиття [1]. Після лиття утворюються, так звані ливникові системи, які складаються з самого ливника та певної кількості (від двох до тридцяти) деталей, що з'єднані з ливником. В подальших етапах обробки деталі необхідно відділити від ливників. У місцях з'єднання деталей з ливником утворюється найменша площа поперечного перерізу ливникової системи для зручного відділення деталей від ливників. Такі типи деталей на деяких підприємствах відділяються від ливників за допомогою ручної праці, що є низькопродуктивним та дуже затратним процесом. На інших підприємствах використовується процес масового відділення деталей від ливників, зазвичай, в середині обертальних ємкостей [2, 3]. Однак, обробка в машинах, робочі ємкості яких виконують обертальний рух низькопродуктивна [4], на неї витрачається значна частина технологічного часу.

Постановка завдання. Скоротити час, що витрачається на відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників можна за рахунок підвищення інтенсивності переміщення робочого масиву. Підвищення інтенсивності переміщення робочого масиву

можна досягнути за рахунок використання обладнання [5, 6] в якому робоча ємкість виконує складний просторовий рух.

Однак, на сьогоднішній день практично відсутні будь-які настанови щодо відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників в машині, робоча ємкість якої виконує складний просторовий рух. На єдиному підприємстві України (ПрАТ «Молнія»), що спеціалізується по виготовленню деталей замка «блискавка», технологічні режими обробки приймаються фактично інтуїтивно, без об'єктивного наукового врахування факторів, які можуть впливати на зміну інтенсивності обробки. Окрім того, для обробки даних деталей, до сих пір, використовується застаріле обладнання, а саме галтувальні розділово-полірувальні 8-ми гранні барабани К-36 «Ortilon».

Таким чином, прогнозування технологічного результату на стадії проектування при виконанні відповідних технологічних операцій, є актуальною задачею на сьогоднішній день.

Результати дослідження. Процес відділення металевих деталей від ливників відбувається при їх відносному переміщенні в середині робочої ємкості, що виконує складний просторовий рух. Ливникові системи, переміщаючись в середині ємкості, вдаряються об її стінки, внаслідок чого відбувається руйнування ливникової системи в тих місцях, де ливникова система утворює найменший поперечний переріз. В залежності від кутової швидкості ведучого валу машини в середині ємкості може реалізуватися каскадний, змішаний або водоспадний режими руху робочого масиву. На рис. 1 представлено різні типи ливникових систем замка «блискавка», які можуть оброблятися в ємкостях з різним характером руху.



Рис. 1. Різні типи ливникових систем замка «блискавка»

В роботі [7] отримано вираз, для визначення постійної кутової швидкості ω ведучого валу «базової» конструкції машини в залежності від прискорення центра торця робочої ємкості, що переміщається з меншою інтенсивністю, та її габаритних параметрів:

$$\omega = \sqrt{\frac{a}{n \cdot 0,326}}, \quad (1)$$

де n – це масштабний коефіцієнт машини по відношенню до «базового типорозміру». За базовий типорозмір, у роботі [7], було прийнято машину з наступними геометричними

параметрами: довжина ємкості $l_y=0,160$ м, діаметр ємкості $D_{PC}=0,12$ м, об'єм ємкості $V_{PC}=0,0018$ м³ (1,8 л), міжосьова довжина ємкості $l_{PC}=0,1$ м.

У рівнянні (1) застосовано масштабний коефіцієнт n у відповідності до «базового типорозміру» машини, який представлений у роботі [7]. Даний масштабний коефіцієнт представляє собою пропорційну зміну усіх геометричних розмірів робочої ємкості. Однак, зазвичай на практиці, можуть використовуватися машини в яких не всі розміри змінюються пропорційно до масштабного коефіцієнту. При виконанні технологічного процесу відділення деталей від ливників основним є переміщення робочого масиву вздовж вісі робочої ємкості, коли переважна більшість деталей буде відділятися від ливників саме в момент зіткнень їх із торцями ємкості. У зв'язку з цим, більш доречніше буде, у рівняння (1) замість масштабного коефіцієнту n ввести відношення довжини робочої ємкості l_y , для якої розраховується кутова швидкість ведучого валу машини ω до довжини робочої ємкості «базового типорозміру» $l_{y.баз.}=0,16$ м, цим самим виключивши вплив такого геометричного параметру, як діаметр робочої ємкості. З урахуванням цього, вираз (1) матиме вигляд:

$$\omega = \sqrt{\frac{a}{2,04 \cdot l_y}}. \quad (2)$$

Далі необхідно визначити прискорення з яким буде рухатися робочий масив в середині робочої ємкості під час виконання технологічної операції відділення деталей від ливників.

Відомо [8, 9], що в машині, ємкість якої виконує складний просторовий рух, робоче середовище (оброблювані деталі), найбільш інтенсивно переміщається вздовж осі ємкості. Робоче середовище, рухаючись вздовж осі ємкості X , між її протилежними торцями, переміщається чотири рази за один оберт ведучого валу машини та має найбільшу амплітуду переміщення. Відділення деталей від ливників буде відбуватися в той час, коли робоче середовище, рухаючись вздовж осі ємкості X вдарятиметься об один з торців ємкості, що розташований нижче по відношенню до протилежного. У зв'язку з цим будемо розглядати переміщення робочого масиву лише вздовж осі X робочої ємкості.

При водоспадному режимі руху відбувається вільний політ робочого масиву між протилежними торцями ємкості, тобто фактично повністю виключається вплив сили тертя, яка неминуче буде виникати при каскадному та змішаному режимах руху. При каскадному та змішаному режимах руху інтенсивність переміщення робочого середовища між протилежними торцями ємкості буде зменшена за рахунок виникнення сили тертя між робочим середовищем та стінкою ємкості, по якій воно буде повністю чи частково проковзувати.

Розглянемо переміщення робочого масиву між протилежними торцями ємкості при реалізації різних режимів руху. При водоспадному режимі руху деталі будуть знаходитися у стані вільного польоту. Оброблювані деталі, при їх вільному польоті вздовж осі ємкості X , будуть переміщатися, як єдиний масив фактично під дією двох сил – сили інерції F_{in} та сили тяжіння G . При каскадному режимі руху буде виникати ще й сила тертя $A_{Fmp.x}$ при проковзуванні робочого масиву по внутрішній стінці робочої ємкості.

Для визначення напрямку векторів сил, які діють на робочий масив, розглянемо відповідне положення ємкості. Розрахункова схема для визначення сил, що діють на робочий

масив представлена на рис. 2 (а – при реалізації водоспадного режиму, б – при реалізації каскадного режиму руху).

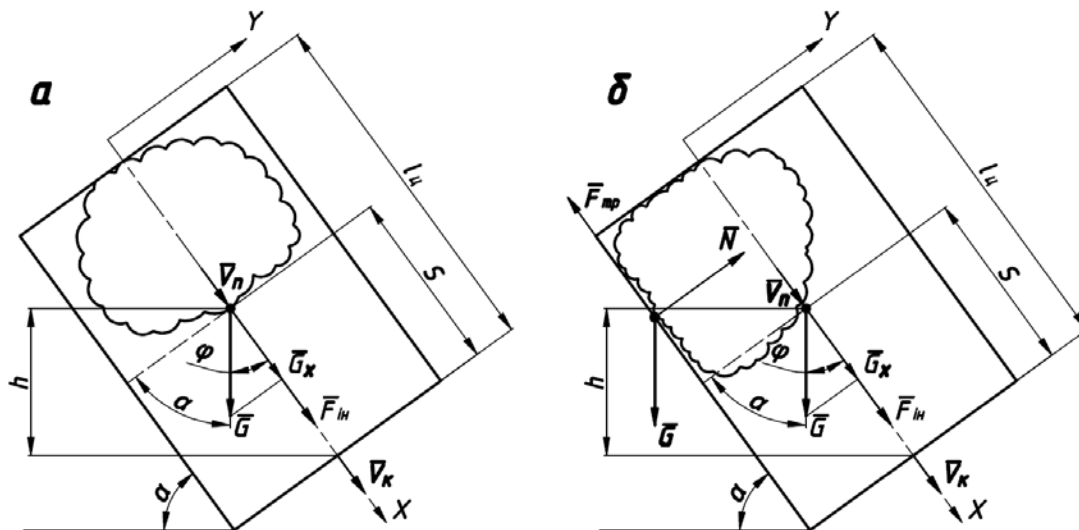


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення робіт сил, що діють на робочий масив (а – при реалізації водоспадного режиму, б – при реалізації каскадного режиму руху)

Відомо [10, 11], що найінтенсивніше вздовжосьове переміщення робочого середовища в середині ємкості відбувається в тому випадку, коли утворюється максимальний кут нахилу α осі робочої ємкості до горизонтальної площини. В базовій конструкції машини [12] кут α становить 54° . Саме, перед досягненням такого положення робочої ємкості, центр її торця, де сконцентроване усе робоче середовище, рухаючись вгору, починає різко сповільнятися та дуже швидко змінює своє положення, в результаті чого, робочий масив, під дією сили інерції, що отримав від торця ємкості, починає рухатися вниз, вздовж осі ємкості X , до протилежного її торця. Протилежний торець ємкості, в цей час, так само, швидко змінивши своє розташування та опиняється вже в крайньому нижньому положенні. Таким чином, фактично відбувається вільний політ робочого масиву від верхнього торця до нижнього під дією сили інерції F_{in} та доповнюється силою тяжіння G . Будемо вважати, що напрям сили інерції співпадає з віссю X робочої ємкості, відповідно напрям сили тяжіння направлений вертикально вниз. Між напрямками цих сил утворюється кут φ .

Запишемо теорему про зміну кінетичної енергії матеріальної точки, розглянувши переміщення робочого масиву, як єдине ціле, в момент зіткнення з торцем робочої ємкості:

$$\frac{m_x V_{k,x}^2}{2} - \frac{m_x V_{n,x}^2}{2} = \sum A_{i,x}, \quad (3)$$

де m_x – маса усього робочого масиву, $V_{k,x}$ – швидкість робочого масиву в момент зіткнення з торцем робочої ємкості, $V_{n,x}$ – швидкість робочого масиву в момент початку його переміщення $V_{n,x}=0$, A_i – роботи всіх сил, що діють на робочий масив під час його вільного польоту.

В зв'язку з тим, що в процесі виконання технологічних операцій, обробляються (відділяються від ливників) різні типи ливникових систем, у яких різна кількість деталей, що

з'єднані з ливником, то в позначення додавався нижній індекс x . Нижній індекс x відповідав кількості деталей, що закріплені на ливниковій системі відповідного типу.

В свою чергу:

$$\sum A_{i.x} = A_{F_{in}.x} + A_{G.x} + A_{F_{mp}.x}, \quad (4)$$

де $A_{F_{in}.x}$ – робота сили інерції, $A_{G.x}$ – робота сили тяжіння, $A_{F_{mp}.x}$ – робота сили тертя.

Далі запишемо вираз для визначення роботи сили інерції:

$$A_{F_{in}.x} = F_{in.x} \cdot l_{роб.}, \quad (5)$$

де $l_{роб.}$ – переміщення робочого масиву вздовж осі ємкості.

Вільне переміщення робочого масиву $l_{роб.}$ в середині ємкості вздовж її вісі залежить від ступеня її заповнення. Вираз для визначення переміщення робочого масиву $l_{роб.}$ вздовж осі ємкості, в залежності від ступеня заповнення ємкості, матиме вигляд:

$$l_{роб.} = \frac{(100 - V_{роб.x}) \cdot l_u}{100}, \quad (6)$$

де $V_{роб.x}$ – об'єм заповнення робочої ємкості у %.

Вираз для визначення сили тяжіння матиме вигляд:

$$A_{G.x} = G \cdot h, \quad (7)$$

де h – висота, на яку опускається сипкий масив. Вираз для визначення h , матиме вигляд:

$$h = l_{роб.} \sin \alpha. \quad (8)$$

Вираз (7) з урахуванням (8) матиме вигляд:

$$A_{G.x} = Gl_{роб.} \sin \alpha. \quad (9)$$

Силу інерції та силу тяжіння можна визначити наступним чином:

$$F_{in.x} = ma, \quad (10)$$

де a – прискорення, з яким переміщається робочий масив в середині ємкості, тобто максимальне прискорення, з яким переміщався центр торця ємкості безпосередньо перед різким його сповільненням, в той час, як робочий масив безпосередньо контактував з ним.

$$G_x = mg, \quad (11)$$

де g – прискорення вільного падіння.

Оскільки розглядаємо переміщення робочого масиву лише вздовж вісі ємкості X і напрям сили тяжіння не співпадає з цією віссю, то будемо приймати до уваги лише складову сили тяжіння G_x , яка діє вздовж осі ємкості x , таким чином, з урахуванням виразу (11):

$$G_x = mg \sin \alpha, \quad (12)$$

Підставимо значення виразів (12) та (11) у рівняння (5) та (9) відповідно:

$$A_{F_{in}.x} = ma_g l_{роб.}. \quad (13)$$

$$A_{G.x} = mgl_{роб.} \sin^2 \alpha. \quad (14)$$

Робота сили тертя $A_{F_{mp}.x}$ буде залежати від реалізації відповідного режиму руху робочого масиву. При реалізації водоспадного режиму руху вплив роботи сили тертя буде виключений, $A_{F_{mp}.x}=0$. При каскадному режимі рух увесь робочий масив, при переміщенні

між торцями, проковзує по поверхні робочої ємкості. Робота сили тертя визначатиметься наступним чином:

$$A_{F_{\text{тнх}}} = fmg l_{\text{роб.}} \cos \alpha, \quad (15)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання. Експериментальним шляхом було встановлено коефіцієнт тертя ковзання $f \approx 0,38$.

Відомо [4], що при змішаному режимі рух приблизно половина робочого масиву буде знаходитися у стані вільного польоту, а інша половина буде переміщатися між торцями, проковзуючи по внутрішній поверхні робочої ємкості.

В зв'язку з цим, у вираз (15) додамо коефіцієнт μ відповідності режиму руху робочого масиву. Для водоспадного режиму рух – $\mu=0$, для каскадного – $\mu=1$, для змішаного – $\mu=0,5$. Запишемо вираз (15) з урахуванням коефіцієнту μ :

$$A_{F_{\text{тнх}}} = \mu fmg l_{\text{роб.}} \cos \alpha. \quad (16)$$

Запишемо рівняння (1) з урахуванням (13), (14) та (16):

$$\frac{m_x V_{\text{к.х}}^2}{2} = mal_{\text{роб.}} + mgl_{\text{роб.}} \sin^2 \alpha - \mu fmg l_{\text{роб.}} \cos \alpha. \quad (17)$$

Виконавши арифметичні та тригонометричні перетворення, виразимо a з рівняння (17):

$$a = \frac{0,5V_{\text{к.х}}^2 - gl_{\text{роб.}} + gl_{\text{роб.}} \cos 2\alpha + \mu fgl_{\text{роб.}} \cos \alpha}{l_{\text{роб.}}}. \quad (18)$$

Таким чином, за виразом (18) можна визначити необхідне повне прискорення торця ємкості a , яке забезпечує реалізацію відділення деталей від ливників. Для розрахунку необхідного повного прискорення торця ємкості a потрібно задаватися геометричними параметрами робочої ємкості, зокрема довжиною ємкості $l_{\text{ц}}$, а також знати значення кінцевої лінійної швидкості $V_{\text{к.х}}$ переміщення робочого масиву в момент зіткнення зі стінкою робочої ємкості, яка забезпечує відділення деталі від ливника.

Далі підставимо вираз (18) у рівняння (2):

$$\omega = \sqrt{\frac{0,5V_{\text{к.х}}^2 - gl_{\text{роб.}} + gl_{\text{роб.}} \cos 2\alpha + \mu fgl_{\text{роб.}} \cos \alpha}{2,04 \cdot l_{\text{ц}} \cdot l_{\text{роб.}}}}. \quad (19)$$

Висновки:

1. Досліджено процес відділення металевих деталей замка «блискавка» в машині, робоча ємкість якої виконує складний просторовий рух, для визначення необхідної кутової швидкості ведучого валу машини.

2. Отримані математичні залежності для розрахунку кутової швидкості ведучого валу машини зі складним рухом робочої ємкості для реалізації технологічного процесу відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників.

Література

1. Бурмістенков О.П. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості: монографія / Під заг. ред. В.П. Коновала. – Хмельницький: ХНУ, 2007. – 255 с;
2. Першин В.Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / Першин В.Ф., Однолько В.Г., Першина С.В. // Монография – М.: Машиностроение, 2009. – 220 с;
3. Валуйский, В.Я. Продвижение сыпучих продуктов через наклонный барабан / В.Я. Валуйский // Известия вузов. Сер. Пищевая технология. – 1965. – № 1. – С. 139 – 142;
4. Залюбовський М. Г. Машини зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей / М. Г. Залюбовський, І. В. Панасюк, В. В. Малишев – К.: Університет «Україна», 2018. – 228 с;
5. Панасюк І.В. Визначення залежності режиму руху робочого середовища у ємкості зі складним рухом від кутової швидкості ведучого валу / І.В. Панасюк, М.Г. Залюбовський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2015. – №1. – С. 43-52;
6. Панасюк І.В. Визначення закону зміни кутової швидкості ведучого валу машини для обробки деталей зі складним рухом робочої ємкості / І.В. Панасюк, М.Г. Залюбовський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2015. – №5. – С. 40-46;
7. Igor Panasyuk. Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process / Igor Panasyuk, Mark Zalyubovskiy // Metallurgical and Mining Industry – 2015. – №3. – С. 260-264;
8. Панасюк І.В. Експериментальне дослідження руху частинки сипкого середовища у робочій ємкості, що здійснює складний рух / І.В.Панасюк, М.Г.Залюбовський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2014. – №6. – С. 35-42;
9. С. Mayer-Laigle. Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula mixer / С. Mayer-Laigle, С. Gatumel, Н. Berthiaux // Chemical Engineering Research and Design

References

1. Burmistenkov, O. (2007). *Vyrobnytstvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vzuttievii ta shkirhalantereynii promyslovosti: monohrafiia* [Manufacture of cast details and articles of polymeric materials in the shoe and leather industry: monograph]. Khmelnytskyi: KhNU [in Ukrainian].
2. Pershin, V., Odnolko, V., & Pershina, S. (2009). *Pererabotka sypuchikh materialov v mashinakh barabannogo tipa* [Processing bulk materials in drum type machines]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian];
3. Valuiskii, V. (1965). *Prodvizhenie sypuchikh produktov cherez naklonnyi baraban* [Promotion of bulk products through an inclined drum]. *Izvestiia vuzov. Pishchevaia tekhnologiya – News of universities. Food technology*, 1, 139 – 142 [in Russian];
4. Zalyubovskiy, M., Panasyuk, I., & Malyshev V. (2007). *Mashyny zi skladnym rukhom robochykh yemkosti dlia obrobky polimernykh detalei: monohrafiia* [Machines with complex movement of working capacities for processing of polymer parts]. Kyiv: University “Ukraine” [in Ukrainian].
5. Panasyuk, I., Zalyubovskiy, M. (2015). *Vyznachennia zalezhnosti rezhymu rukhu robochoho seredovyscha u yemkosti zi skladnym rukhom vid kutovoi shvydkosti veduchoho valu* [Determination of the dependence of the mode of motion of the working medium in a container with complex motion on the angular velocity of the drive shaft], *Visnyk KNUTD – Bulletin of the KNUTD*, 1, 43-52 [in Ukrainian].
6. Panasyuk, I., Zalyubovskiy, M. (2015). *Vyznachennia zakonu zminy kutovoi shvydkosti veduchoho valu mashyny dlia obrobky detalei zi skladnym rukhom robochoi yemkosti* [Determination of the law of change of angular velocity of the driving shaft of the machine for processing parts with complex movement of the working capacity], *Visnyk KNUTD – Bulletin of the KNUTD*, 5, 40-46 [in Ukrainian].
7. Panasyuk, I., Zalyubovskiy, M. (2015). *Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process*. *Metallurgical and Mining Industry*, Vol. 3, 260 – 264 [in English];
8. Panasiuk, I., Zaliubovskyi, M. (2014). *Eksperementalne doslidzhennia rukhu chastynky sypkoho seredovyscha u robochii yemkosti, shcho zdiisniue skladnyi rukh*. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dyzainu* [Experimental study of the motion of a friable medium particle in a working volume carrying complex movement], *Visnyk KNUTD – Bulletin of the KNUTD*, 6, 35-42 [in Ukrainian].

Volume 95, March 2015, Pages 248-261;

10.M. Marigo. Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation EngD / M. Marigo. - The University of Birmingham, UK., 2012;

11.Zalyubovskiy M.G. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working container / Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design – 2019. – №2. Vol 132,– С. 24-32;

12.Панасюк І.В. Визначення деяких конструктивних параметрів змішувачів з тривимірним обертанням барабану / І.В. Панасюк, М.Г. Залюбовський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2013. – №5. – С. 76-81.

9. Mayer-Laigle C., Gatamel, C., & Berthiaux, H. (2015). Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula mixer. Chemical Engineering Research and Design. [in English];

10. Marigo, M. (2012). Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation EngD. [in English];

11. Zalyubovskiy, M., Panasyuk, I., Smirnov Y., Klaptsov, Y., & Malyshev, V. (2019). Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working container. Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design, 2, Vol 132, 24-32. [in English];

12. Panasyuk, I., Zalyubovskiy, M. (2013). Vyznachennia deiakykh konstruktyvnykh parametriv zmishuvachiv z tryvymirnym obertanniam barabanu [Determination of some design parameters of mixers with three-dimensional rotation of the drum], Visnyk KNUTD – Bulletin of the KNUTD, 5, 76-81 [in Ukrainian].

ZALIUBOVSKIY MARK

markzalubovskiy@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6258-0088>

Open University of Human Development «Ukraine»

IGOR PANASYUK

panasjuk1961@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6671-4266>

ResearcherID: D-4255-2017

Kyiv National University of Technologies & Design

MALYSHEV VICTOR

viktor.malyshev.igic@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2756-3236>

Open University of Human Development «Ukraine»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВЕДУЩЕГО ВАЛА МАШИНЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ: ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ЗАЛЮБОВСКИЙ М. Г.¹, ПАНАСЮК И. В.², МАЛЫШЕВ В. В.¹

¹ Открытый международный университет развития человека «Украина»,

² Киевский национальный университет технологий и дизайна,

Цель. Аналитическое исследование процесса отделения металлических деталей замка «молния» в машине, рабочая емкость которой выполняет сложное пространственное движение, для определения необходимой угловой скорости ведущего вала машины.

Методика. Проведено аналитическое исследование основных факторов, влияющих на реализацию технологического процесса отделения металлических деталей замка «молния» от литников в галтовочных емкостях, выполняющих сложное пространственное движение.

Результаты. На основе проведенного аналитического исследования процесса отделения металлических деталей замка «молния» от литников получены математические зависимости, позволяющие прогнозировать технологический результат на стадии проектирования. Аналитически установлено, что при реализации водопадного режима движения практически отсутствует сила трения рабочего массива по внутренним стенкам емкости, что создает условия для повышения интенсивности выполнения технологического процесса. Соответственно при каскадном режиме движения интенсивность отделения деталей от литников будет значительно меньше.

Научная новизна. Установлена взаимосвязь между геометрическими параметрами рабочей емкости, выполняющей сложное пространственное движение, конечной скоростью перемещения рабочего массива в момент столкновения с торцом емкости и угловой скоростью ведущего вала машины, которая обеспечивает реализацию отделения металлических деталей замка «молния» от литников.

Практическая значимость. Полученные математические зависимости для расчета угловой скорости ведущего вала машины со сложным движением рабочей емкости для реализации технологического процесса отделения металлических деталей замка «молния» от литников. Результаты исследований могут быть использованы предприятиями на стадии проектирования соответствующих технологических процессов обработки металлических деталей с целью повышения продуктивности изготовления и одновременного уменьшения энергозатрат.

Ключевые слова: отделение от литников, замок «молния», металлические детали, рабочая емкость.

DETERMINATION OF THE ROTATIONAL SPEED OF THE DRIVE SHAFT A MACHINE FOR PROCESSING PARTS: THE ENERGY APPROACH ZALYUBOVSKIY M. G.¹, PANASYUK I. V.², MALYSHEV V. V.¹

¹ Open University of Human Development «Ukraine»

² Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. An analytical study of the process of separating the metal parts of the "lightning" lock in a machine with complex movement of working capacity, to determine the necessary angular velocity of the drive shaft of the machine.

Methodology. An analytical study of the main factors affecting the implementation of the technological process of separating the metal parts of the "lightning" lock from the gates in a machine with complex movement of working capacity.

Results. Based on the analytical study of the process of separating the metal parts of the "lightning" lock from the gates, mathematical dependences are obtained that allow us to predict the technological result at the design stage. It has been analytically established that during the implementation of the waterfall mode of movement, there is practically no friction force of the working mass along the inner walls of the working capacity, which creates conditions for increasing the intensity of the process. Accordingly, with a cascade mode of motion, the intensity of separation of parts from the gates will be significantly less.

Scientific novelty. A relationship has been established between the geometric parameters of the working capacity, performing complex spatial motion, the final velocity of the working mass at the moment of collision with the end face of the tank, and the angular velocity of the drive shaft of the machine, which ensures the separation of the metal parts of the "lightning" lock from the gates.

Practical significance. The obtained mathematical dependences for calculating the angular velocity of the drive shaft of the machine with a complex movement of the working capacity for the implementation of the technological process of separating the metal parts from the gates. The research results can be used by enterprises at the stage of designing the appropriate technological processes for processing metal parts in order to increase production productivity and at the same time reduce energy costs.

Key words: separation from sprues, "lightning" lock, metal parts, working capacity.

УДК 631.371

ДЕМІШОНКОВА С. А., ДЕМІШОНКОВ Я. В., КУЛІК Т. І.
Київський національний університет технологій та дизайну

ФУНКЦІОНАЛЬНА ДІАГНОСТИКА ПАРАМЕТРІВ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Мета. Розробка методу та технічних засобів дослідження характеристик асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором з використанням перетворювача напруги програмно-апаратного комплексу.

Методика. Дослідження характеристик асинхронного двигуна: пуск двигунів при зниженій напрузі, досліди неробочого ходу, навантаження, короткого замикання, визначення низки різноманітних параметрів двигунів, зняття робочих та інших характеристик, розгляд різних способів регулювання частоти обертання тощо.

Результати. Визначено типові характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при різних режимах роботи, проведено огляд найпоширеніших комплексних стендів для дослідження асинхронних двигунів, виконано порівняльний аналіз елементів навантаження асинхронного двигуна. Характеристики, отримані для досліджуваного двигуна, є дуже схожими до вигляду стандартних характеристик асинхронних двигунів, що використовуються у виробництві, та у лабораторних стендах.

Наукова новизна. Обґрунтовано можливість застосування модернізованого стенду з використанням спеціальної схеми перетворювача напруги, що в значній мірі збільшить час безперервної роботи трифазного двигуна та знизить витрати електроенергії.

Практична значимість. Розроблено стенд для дослідження характеристик асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором з використанням перетворювача напруги, який дозволить виміряти опір ізоляції обмоток щодо корпусу і між фазами обмоток, проводити випробування ізоляції обмоток щодо корпусу на електричні міцність, безперервно контролювати параметри асинхронного двигуна в процесі його використання. Завдяки малогабаритності, економічним та технічним показникам, даний стенд є зручним у експлуатації при дослідженні асинхронного двигуна у трифазному і однофазному режимах, а також сприяє більш сучасному та демонстративному навчанню.

Ключові слова: електродвигун, експериментальний стенд, програмно-апаратний метод, робочі характеристики.

Вступ. В даний час асинхронні електродвигуни є споживачами понад 70% всієї електроенергії в країні. Досвід експлуатації електродвигунів свідчить про велику кількість відмов, що трапляються у зв'язку з аварійними ситуаціями. Щорічно в результаті аварій виходять з ладу до 20...25 % застосовуваних асинхронних двигунів. Додатково до збитків додається зниження електро- і пожежобезпеки, пов'язане з можливими короткими замиканнями, які можуть бути присутніми в обмотці статора або ротора пошкодженого електродвигуна.

Постановка завдання. Для визначення та усунення порушень в роботі асинхронного двигуна існує багато методів, але всі вони мають певні недоліки та переваги. На сьогоднішній день актуальним завданням є розроблення методу, який дозволить виконувати діагностування асинхронного двигуна у безперервному режимі в процесі його роботи.

Результати дослідження. В даний час відсутня єдина концепція діагностування електродвигунів. Загальноприйняті засоби захисту не забезпечують збереження електродвигуна і знижують ймовірність виникнення лише деяких з перерахованих вище

випадків. Тому виникає потреба діагностики стану електродвигуна в процесі його роботи, тобто функціональної діагностики. Відносно великі терміни між випробуваннями, які регламентуються ГОСТ 7217-87, не дозволяють виявляти пошкодження на ранній стадії їх виникнення, тобто не можуть бути зафіксовані своєчасно.

Сучасні системи і методи діагностики електрообладнання можна розділити на дві групи.

До першої групи належать методи тестової діагностики, які вимагають формування штучних збурювань, що впливають на досліджуваний об'єкт: вимірювання опору ізоляції, струмів витoku, внутрішнього опору обмоток, тангенса кута діелектричних втрат обмоток, метод високовольтного імпульсу та ін.

Друга група включає в себе методи оперативної або функціональної діагностики, використовувані в першу чергу для електроустаткування, що є джерелом природних збурень в процесі роботи.

В даний час тестове діагностування – основний вид виявлення дефектів електрообладнання. Воно визначило сформовану структуру технічного обслуговування та ремонту за регламентом. Однак така діагностика сприяє не тільки попередженню розвитку різних дефектів, але і їх появі. Наприклад, при проведенні планових ремонтів електричних машин, після повного складання, двигун піддається високовольтним випробуванням, які чинять згубний вплив на ізоляцію машини, викликаючи появу мікрodefektів в обмотці, що розвиваються в процесі роботи електромашини під впливом несприятливих чинників: неякісної електроенергії, перевантажень, частих пусків і зупинок. З кожним високовольтним випробуванням при планово-попереджувальних ремонтах число дефектів збільшується, що в кінцевому підсумку призводить до аварійного виходу з ладу електричного двигуна. Крім того, кожне розбирання та збирання електродвигуна збільшує ці мікрodefekти.

Серед інших недоліків тестової діагностики можна відзначити також тимчасове припинення роботи, доки перевіряється обладнання, відсутність можливості захисного відключення обладнання під час його роботи для запобігання повного виходу його з ладу, відсутність контролю ненормальних режимів роботи даного обладнання і т.д.

Для переходу з обслуговування та ремонту за регламентом на ремонт і обслуговування по фактичному стану необхідна ретельна діагностика електрообладнання, причому, щоб підготуватися до ремонту, бажано виявити всі дефекти, що впливають на ресурс, задовго до відмови. З цих причин необхідно застосування методів діагностики не тільки тих, що відносяться до категорії функціональних, але і тих, що дозволяють виявити дефект конкретної частини електрообладнання. До того ж методи функціональної діагностики економічно найбільш переважні, оскільки не вимагають навіть тимчасового виведення електрообладнання з експлуатації.

Для діагностики асинхронних електродвигунів в оперативному режимі в даний час використовуються кілька способів діагностики, серед яких найбільш поширений метод віброакустичної діагностики. Головним недоліком такого методу є необхідність використання спеціальних віброакустичних датчиків і складність їх установки.

Останнім часом в світі отримали широкий розвиток методи діагностики стану електричних машин, засновані на виконанні моніторингу споживаного струму з наступним

виконанням спеціального спектрального аналізу отриманого сигналу. Гідність цього методу в порівнянні з попереднім – можливість контролю стану як механічних, так і електричних частин електродвигунів по електричному параметру, а зокрема, за сигналом споживаного струму, що значно спрощує установку схеми для діагностики і позбавляє від необхідності введення спеціальних датчиків. Суть даного методу полягає в аналізі спектру гармонік струму, споживаного електродвигуном, шляхом виявлення періодично повторюваних змін сигналу на графіку, відповідних конкретному виду пошкодження електродвигуна. Однак, через появу помилкових гармонік сигналу при різних перешкодах електричної мережі, з підключеним до неї електродвигуном, можливі невірні результати діагностики. На додаток до цього невідомо, яким буде графік спектрального аналізу струму при нестабільній напрузі в мережі.

Сучасні електротехнічні засоби, що базуються на використанні програмованих мікроконтролерів, дозволяють найбільш гнучко реалізувати захист і функціональну діагностику електродвигунів за їх електричними параметрами.

Найбільш вдалим методом є використання програмно-апаратного комплексу (рис. 1.) [1,8], що складається з комп'ютера і цифрового пристрою-посередника, який виконує необхідні вимірювання та передає їх до комп'ютера. У якості вимірюваних електричних величин можуть виступати: оперативний струм, споживана потужність і т.д. Програма, що виконується на комп'ютері, повинна, в свою чергу, певним чином обробити вхідну інформацію і визначити найбільш ймовірний вид пошкодження працюючого електродвигуна або зробити висновок щодо його справності. Цей метод найбільш ефективний, оскільки дозволяє зберігати на комп'ютері великі бази даних з інформацією про відслідковування динаміки пошкоджень електродвигуна з подальшим прогнозуванням виходу його з ладу.

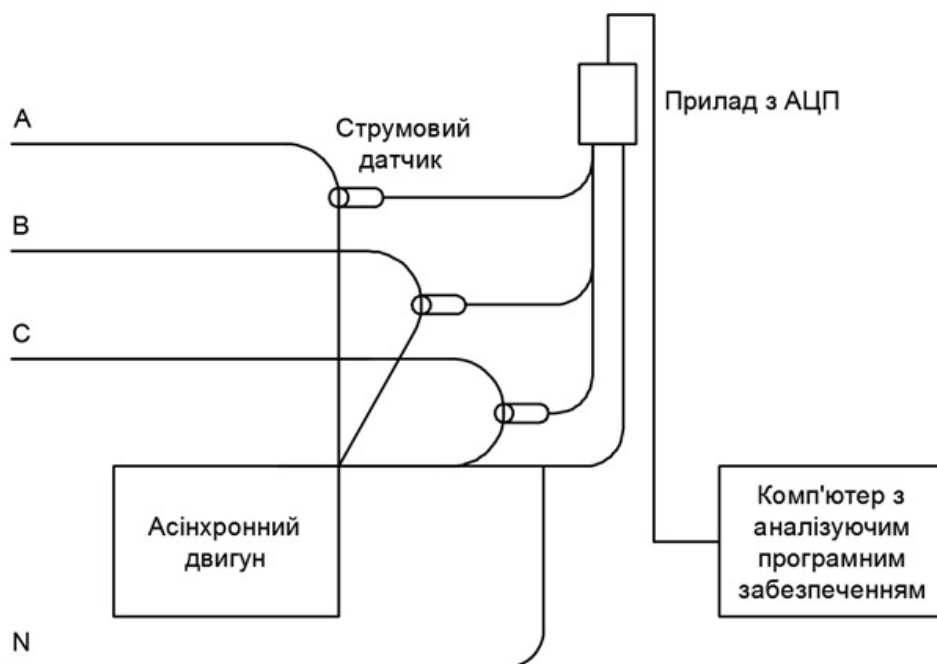


Рис 1. Схема підключення приладів в діагностичному програмно-апаратному комплексі

Крім цього, комп'ютер є більш потужним засобом обробки інформації, ніж мікроконтролер, що, зокрема, дозволяє використовувати сучасні технології, в тому числі і технології штучного інтелекту, такі як використання штучних нейронних мереж, нечіткої логіки і експертних систем.

Відомо, що магнітне поле ротора працюючого асинхронного електродвигуна впливає на магнітне поле його обмотки статора, що призводить до періодичних коливань електричних величин електродвигуна, таких як споживаний струм, потужність або напруга обмотки статора. Період даних коливань пропорційний частоті обертання ротора. Таким чином, аналізуючи форму графіка сигналу будь-якої з електричних величин на даний час можна виявити пошкодження в електромеханічній частини електродвигуна і розпізнати його вид. Для вирішення даної проблеми можна використовувати багато різних підходів [2–5,9,10]. Наприклад, можна побудувати апроксимаційну функцію по декільком початковим точкам сигналу, відповідного конкретному виду ушкодження, і в процесі діагностики порівнювати поточні вимірювані значення зі значеннями даної функції з певною часткою похибки. Однак апроксимація складних нелінійних сигналів призводить до великих похибок, які посилюються додатковими перешкодами електричної мережі з підключеним електродвигуном.

Для забезпечення плавного регулювання та швидкодії була розроблена спеціальна схема перетворювача напруги. Його використання в значній мірі збільшує час безперервної роботи трифазного двигуна і економить електроенергію. Перетворювач дозволяє довести ККД до 98%, що досягається збільшенням частоти комутації. Механічні регулятори на таке не здатні. При проектуванні даного регулятора напруги був зроблений наголос на ефективність конструкції, мінімальну собівартість, наявність необхідного захисту, негроміздку конструкцію.

Схема стенда передбачає проведення приймально-задавальних випробувань електродвигунів з короткозамкненим та фазним ротором [6].

В ході проведених експериментів були отримані наступні дані, що занесені в нижченаведені таблиці (табл. 1 – 5). Номінальна потужність двигуна складає 275 Вт = 0,275 кВт, номінальна швидкість обертання двигуна 1500 об/хв, опір обмоток 0,3 Ом.

Таблиця 1

Дані характеристики холостого ходу

XX	U, В	I, А	P ₀ , Вт
180	61	0,104046	23,8
150	73	0,115607	28,4
120	92	0,138728	32,6
90	112	0,161850	43,2
70	157	0,231214	67,0
50	220	0,404624	120

Значення точок в першій таблиці відповідає значенню точки на регульовальному пристрої в числовому значенні на дисплеї. Для характеристики холостого ходу була побудована діаграма, що показує залежність струму та потужності від напруги (рис. 2).

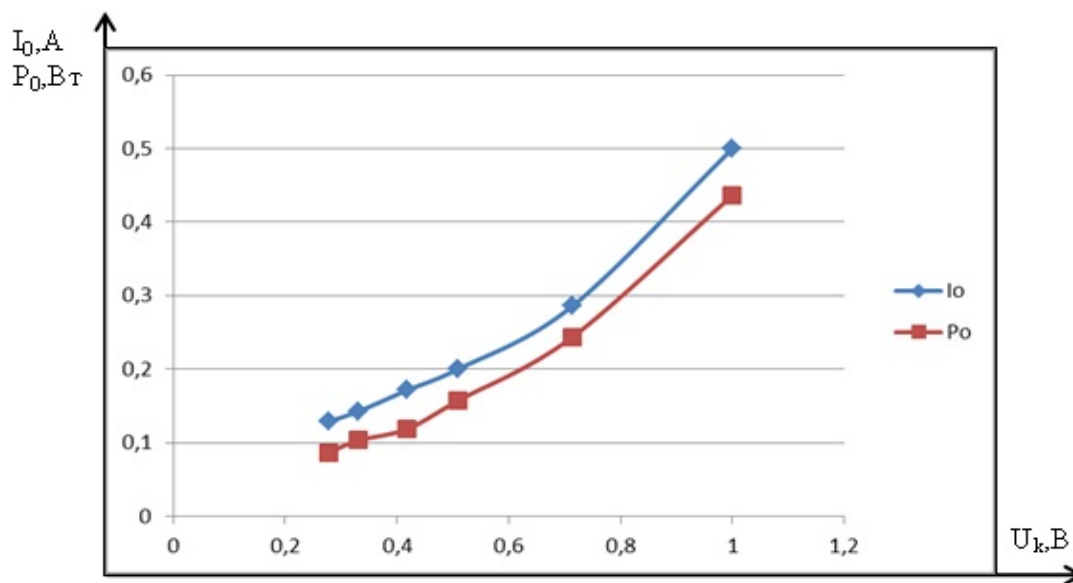


Рис 2. Характеристика холостого ходу двигуна

Таблиця 2

Значення параметрів двигуна у відносних одиницях

I в.о.	P в.о.	U в.о.
0,128571	0,086545	0,277273
0,142857	0,103273	0,331818
0,171429	0,118545	0,418182
0,2	0,157091	0,509091
0,285714	0,243636	0,713636
0,5	0,436364	1

Наступним режимом двигуна, до якого його переводили в ході експерименту, був режим короткого замикання. Режим короткого замикання робився заклинюванням ротору або примусовою його зупинкою, гальмуванням, в такому режимі струм статора перевищує значення номінального струму в 5–7 разів (табл. 3). Цей режим є короткочасним.

Таблиця 3

Дані характеристики короткого замикання

КЗ	U, В	P0, Вт	I, А
170	65	72	0,809249
250	44	30,6	0,462428
300	36	18	0,317919

Отримана за експериментальними даними характеристика короткого замикання досліджуваного двигуна наведена на рис. 3.

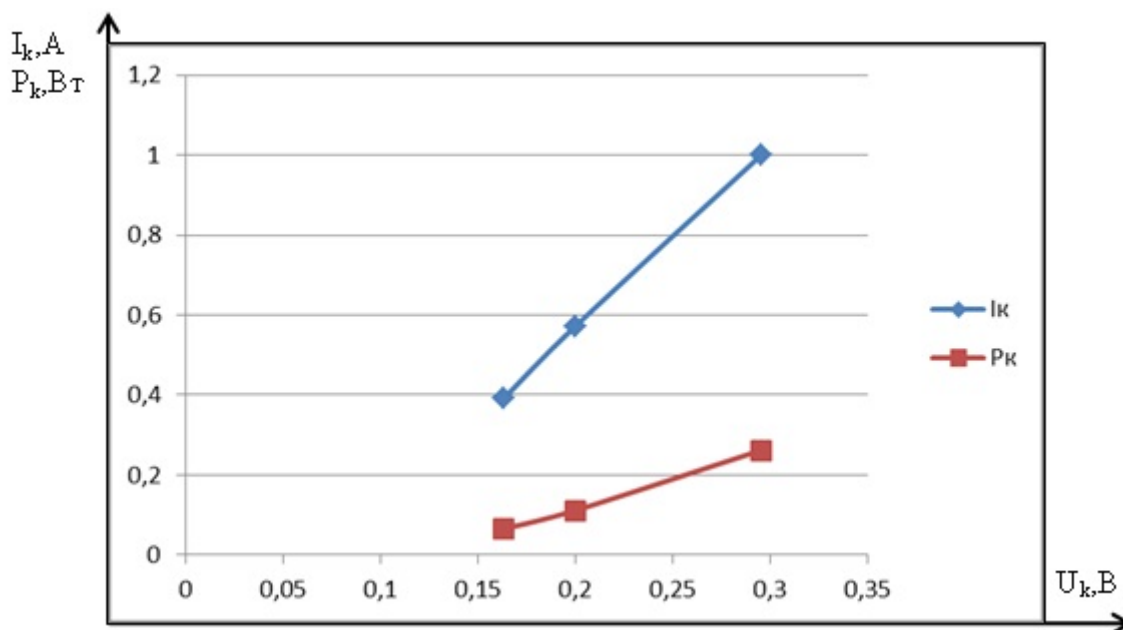


Рис 3. Характеристика короткого замикання

Таблиця 4

Значення ХКЗ у відносних одиницях

I _{во}	P _{во}	U _{во}
1	0,261818	0,295455
0,571429	0,111273	0,2
0,392857	0,065455	0,163636

Наступним режимом був режим робочого ходу при зміні напруги живлення двигуна (табл. 5).

Таблиця 5

Значення даних робочого ходу

I, А	P1, Вт	U, В	I, мА	n, об/хв
Двигун	–	Генератор	Генератор	Двигун
0,80924855	378	29	6,3	1427
0,66473988	216	34	4,4	1448
0,57803468	126	37	2,75	1459
0,52023121	61,6	40	1	1472
0,40462428	15,4	0	0	1480

Після зняття значень робочих характеристик, щоб побудувати їх потрібно знайти параметри з використанням паспортних даних двигуна.

Таблиця 6

Шукані параметри двигуна

P1, Вт	P2, Вт	ΣP	ΣPд	P2д	cosφ	η	Мдв	n	s
0,196465	182,7	195,3	97,65	280,35	0,707727	0,741667	1,876204	0,951333	0,048667
0,132564	149,6	66,4	33,2	182,8	0,492332	0,846296	1,205622	0,965333	0,034667
0,100237	101,75	24,25	12,125	113,875	0,330273	0,90377	0,745378	0,972667	0,027333
0,081192	40	21,6	10,8	50,8	0,179407	0,824675	0,329579	0,981333	0,018667
0,049116	0	15,4	7,7	7,7	0,057667	0,5	0,049686	0,986667	0,013333

Таблиця 7

Параметри двигуна у відносних одиницях

Ід*	P2д	cosφ	η	Мдв*	n	s	P1*
1	1,01945455	0,707727273	0,7416667	1,028742	0,951333	0,048667	1,374545
0,82142857	0,66472727	0,492332016	0,8462963	0,661055	0,965333	0,034667	0,785455
0,71428571	0,41409091	0,330272727	0,8450397	0,408698	0,972667	0,027333	0,458182
0,64285714	0,18472727	0,179407407	0,8246753	0,180711	0,981333	0,018667	0,224
0,5	0,028	0,057666667	0,5	0,027243	0,986667	0,013333	0,056

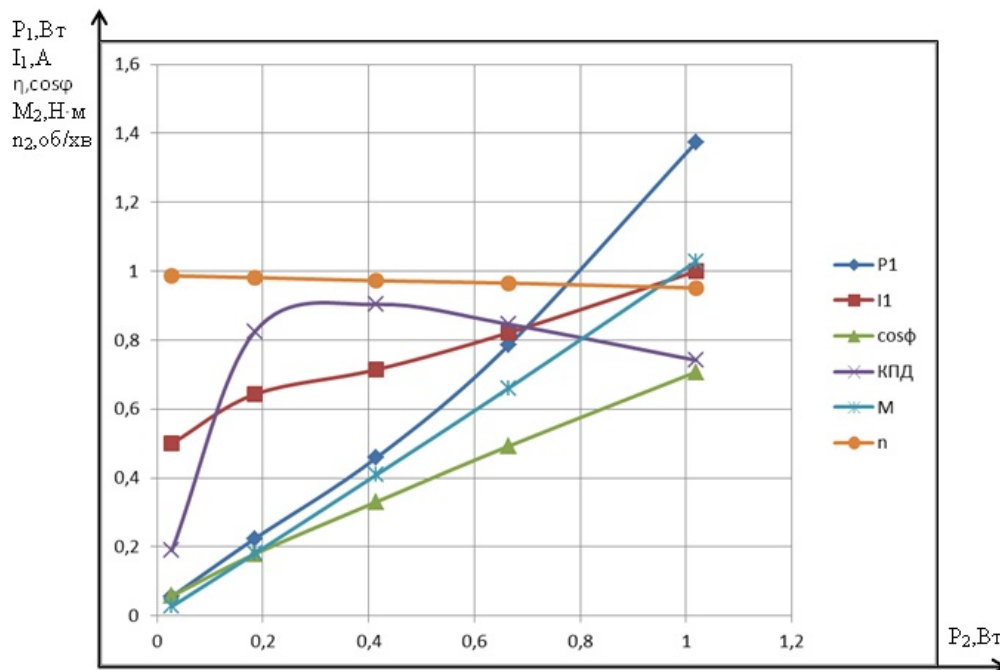


Рис 4. Робочі характеристики двигуна потужністю 0,275 кВт

Струм холостого ходу електродвигуна невеликий, і момент обертання, створюваний ним, дуже близький до нуля, що можна чітко спостерігати на графічних залежностях. Частота обертання в режимі холостого ходу майже дорівнює синхронній швидкості обертання. При навантаженні асинхронного електродвигуна частота обертання падає, а ковзання зростає. Оскільки зростають ЕРС в обмотці ротора, то посилюється струм ротора і росте обертаючий момент. Через невеликий проміжок часу знову відновлюється стан рівноваги між навантажувальним моментом і моментом, що обертає, при певній, більш низькій частоті обертання [7].

Характеристика двигуна $n_2=f(P_2)$ являє собою криву, слабо нахилену до вісі абсцис. Пояснюється це тим, що навіть при номінальному навантаженні, як правило, не перевищує 1–8%. Робота двигуна при невеликому ковзанні досить економічна, так як електричні втрати в роторі пропорційні ковзанню.

Корисна потужність двигуна:

$$P_2 = M_2 \omega_2 = \left(\frac{\pi}{30}\right) M_2 n_2,$$

де $\omega = 2\pi n_2/60$ – кутова швидкість ротора;

M_2 – корисний момент на валу двигуна, Н·м.

Залежність $M_2 = f(P_2)$ криволінійна, так як з ростом навантаження P_2 частота обертання n_2 дещо зменшується.

Залежність струму $I_1 = f(P_2)$ являє собою характеристику, близьку до прямої. Це свідчить про те, що з підвищенням навантаження струм I_1 збільшується практично пропорційно корисній потужності. Ця залежність виходить не з початку координат, так як двигун в режимі холостого ходу ($P_2=0$) використовує з мережі струм холостого ходу I_0 , величина якого у асинхронних двигунів більша, ніж у трансформаторів. Останнє пояснюється наявністю механічних втрат і повітряного проміжку на шляху магнітного потоку двигуна. Струм холостого ходу в асинхронних двигунах може досягати 20–30% від номінального струму $I_{1ном}$. В деяких спеціальних двигунах малої потужності він може досягати і великих значень.

Залежність $\cos\varphi_1 = f(P_2)$ показує: при малих навантаженнях φ_1 має низькі значення (0,2÷0,3). З збільшенням навантаження коефіцієнт потужності збільшується, досягаючи максимуму (0,75÷0,85) при навантаженні, близькому до номінального. Останнє пояснюється тим, що при будь-якому навантаженні двигуна, включаючи режим холостого ходу, двигун використовує з мережі намагнічуючий (реактивний) струм приблизно однакової величини. Тому в режимі холостого ходу і при невеликих навантаженнях споживаний з мережі струм має значну реактивну складову, що і являється причиною низького значення $\cos\varphi_1$. З підвищенням навантаження збільшується активна складова струму I_1 , і коефіцієнт потужності підвищується. При перевантаженнях, що відповідають малим частотам обертання (великому ковзанню), $\cos\varphi_1$ зменшується, що пояснюється збільшенням індуктивного опору обмотки ротора ($x_{2s}=x_{2s}$) при збільшенні ковзання.

З цього можна зробити висновки, що характеристики, отримані для досліджуваного двигуна, є дуже схожими до вигляду стандартних характеристик асинхронних двигунів, що використовуються у виробництві, та у лабораторних стендах. Це означає, що монтаж, побудова та підключення всіх елементів двигуна були зроблені вірно. Отже розроблений стенд можна використовувати в якості стенду для проведення лабораторних робіт та зняття основних характеристик асинхронних двигунів у майбутньому.

Висновки. Розробка методу та стенду дослідження характеристик асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором з використанням перетворювача напруги, дозволить виміряти опір ізоляції обмоток щодо корпусу і між фазами обмоток, проводити випробування ізоляції обмоток щодо корпусу на електричні міцність, безперервно контролювати параметри асинхронного двигуна в процесі його використання. Завдяки малогабаритним, економічним та технічним показникам, даний стенд є зручним у

експлуатації при дослідженні асинхронного двигуна у трифазному і однофазному режимах, а також сприяє більш сучасному та демонстративному навчанню

Характеристики, які зняти з нашого досліджуваного двигуна є дуже схожими до вигляду стандартних характеристик асинхронних двигунів. Розроблений стенд можна успішно використовувати для безперервного контролю параметрів асинхронного двигуна в робочому режимі як у виробництві так і в лабораторних умовах.

Література

1. Ланде Д. В. Програмно-апаратний комплекс інформаційної підтримки прийняття рішень : науково-методичний посібник / Д. В. Ланде, В. М. Фурашев, О. М. Григор'єв. – К. : Інжиніринг, 2006. – 48 с.
2. Частотный преобразователь для электродвигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/econom/721-chastotnyjj-preobrazovatel-dlja.html>.
3. Макаров Д. Преобразователь частоты – векторный, однофазный, схемы и инструкции [Электронный ресурс]. / Макаров Д. – Режим доступа: <https://www.asutpp.ru/avtomatizaciya-proizvodstva/preobrazovatel-chastoty.html>.
4. Схемы любительских частотных преобразователей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elektrik.info/main/praktika/545-shemy-lyubitelskih-chastotnyh-preobrazovateley.html>.
5. Для чего нужен частотник и как сделать его своими руками для трехфазного электродвигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricvdele.ru/elektrooborudovanie/elektrodivigateli/chastotnik-dlya-trehfaznogo-elektrodivigatelya.html>.
6. Низкогуз П. В. Экспериментальный стенд для дослідження асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Комплексна робота. Ч. 2. Дипломна робота. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 56 с.
7. Коваленко М. А. Экспериментальный стенд з малопотужним трифазним асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором / Коваленко М. А., Мальяр І. В. // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського – 2018. – № 6, Том 29 (68), Ч. 1. – С. 64-68.
8. Закладний О.О. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем: Монографія. – К.: Видавництво «Лібра», 2013. – 195 с.
9. Рижков А.О. Обґрунтування методу функціонального діагностування

References

1. Lande D.V., Furashov V.M., Grigoryev O.M. (2006). *Prohramno-aparatnyi kompleks informatsiinoi pidtrymky pryiniattia rishen* : naukovo-metodychnyi posibnyk [Software-hardware complex of information support of decision-making: scientific-methodical manual]. Kyiv, Engineering [in Ukrainian].
2. Chastotnyi preobrazovatel' dlya elektrodvigatelya [Frequency inverter for electric motor]. URL: <http://electricalschool.info/econom/721-chastotnyjj-preobrazovatel-dlja.html>. [in Russian].
3. Makarov D. Preobrazovatel' chastoty – vektorny, odnofaznyy, skhemy i instruktsii [Frequency converter – vector, single-phase, diagrams and instructions]. URL: <https://www.asutpp.ru/avtomatizaciya-proizvodstva/preobrazovatel-chastoty.html>. [in Russian].
4. Skhemy lyubitel'skikh chastotnykh preobrazovateley [Schemes of amateur frequency converters]. URL: <http://elektrik.info/main/praktika/545-shemy-lyubitel'skih-chastotnyh-preobrazovateley.html>. [in Russian].
5. Dlya chego nuzhen chastotnik i kak sdelat' ego svoimi rukami dlya trekhfaznogo elektrodvigatelya [Why do we need frequency converter and how to make it with our own hands for a three-phase electric motor]. URL: <http://electricvdele.ru/elektrooborudovanie/elektrodivigateli/chastotnik-dlya-trehfaznogo-elektrodivigatelya.html>. [in Russian].
6. Nizoguz P. V. (2016). *Eksperymentalnyi stend dlia doslidzhennia asynkhronnoho dvyhuna z korotkozamknеныm rotorom*. Kompleksna robota. Ch. 2. Dyploмна robota [Experimental stand for the study of an induction motor with a short-circuited rotor. Complex work. Part 2. Graduate work]. K., NTUU "KPI" [in Ukrainian].
7. Kovalenko M. A., Malyar I. V. (2018). *Eksperymentalnyi stend z malopotuzhnyym tryfaznym asynkhronnym dvyhunom z korotkozamknеныm rotorom* [Experimental stand with low-power three-phase asynchronous motor with short-circuit rotor]. Scientific notes of VI TU Vernadsky, Vol. 6, 64-68. [in Ukrainian]
8. Zakladnyi O. (2013). *Funktsionalne diahnostuvannia enerhoefektyvnosti elektromekhanichnykh system* [Functional diagnostics of energy efficiency of electromechanical systems]: Kyiv [in Ukrainian].
9. Ryzhkov A. (2008) *Obhruntuvannia metodu*

асинхронного електродвигуна / А.О. Рижков // Технічна електродинаміка. – 2008. № 3. – С. 55-58.

10. Овчаров В.В., Рижков А.О. Цифровий пристрій діагностування експлуатаційних режимів роботи асинхронного електродвигуна за температурою статору / В.В. Овчаров, А.О. Рижков // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2005. Вип. 32. – С. 44-49.

funktsionalnoho diahnostuvannia asynkronnoho elektrodyhuna [Justification of the method of functional diagnosis asynchronous motor] *Tekhnichna elektrodynamika*. – 3, 55-58. [in Ukrainian].

10. Ovcharov V., Ryzhkov A. (2005) *Tsyfrovyi prystrii diahnostuvannia ekspluatatsiinykh rezhymiv roboty asynkronnoho elektrodyhuna za temperaturoiu stali* [Digital device for diagnosing operating modes of asynchronous motor by stator temperature] *Pratsi Tavriiskoi derzhavnoi ahrotekhnichnoi akademii*. – Vol. 32, 44-49. [in Ukrainian].

DEMISHONKOVA SVITLANA

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5678-8114>
Kyiv National University of Technologies & Design

DEMISHONKOV YAROSLAV

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6057-459X>
Kyiv National University of Technologies & Design

TETYANA KULIK

ResearcherID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57196150930>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1006-7853>
Kyiv National University of Technologies & Design

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ДЕМИШОНКОВА С. А., ДЕМИШОНКОВ Я. В., КУЛИК Т. І.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Разработка метода и технических средств исследования характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с использованием преобразователя напряжения программно-аппаратного комплекса.

Методика. Исследование характеристик асинхронного двигателя: пуск двигателей при пониженном напряжении, исследование холостого хода, нагрузки, короткого замыкания, определение ряда различных параметров двигателей, снятие рабочих и других характеристик, обзор различных способов регулирования частоты вращения и т. п.

Результаты. Определены типовые характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при различных режимах его работы, проведен обзор самых распространенных комплексных стендов для исследования асинхронных двигателей, выполнен сравнительный анализ элементов нагрузки асинхронного двигателя. Характеристики, полученные для исследуемого двигателя, очень похожи на стандартные характеристики асинхронных двигателей, используемых в производстве, и в лабораторных стендах.

Научная новизна. Обоснована возможность применения модернизированного стенда с использованием специальной схемы преобразователя напряжения, что в значительной степени увеличит время непрерывной работы трехфазного двигателя и снизит затраты электроэнергии.

Практическая значимость. Разработан стенд для исследования характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с использованием преобразователя напряжения, который позволит измерить сопротивление изоляции обмоток относительно корпуса и между фазами обмоток, проводить испытания изоляции обмоток относительно корпуса на электрическую прочность, непрерывно контролировать параметры асинхронного двигателя в процессе его использования. Благодаря малогабаритности, экономическим и техническим показателям, данный стенд удобен в эксплуатации при исследовании асинхронного двигателя в трехфазном и однофазном режимах, а также способствует более современному и наглядному обучению.

Ключевые слова: электродвигатель, экспериментальный стенд, программно-аппаратный метод, характеристики.

**FUNCTIONAL DIAGNOSIS OF THE PARAMETERS OF THE THREE-PHASE
ASYNCHRONOUS ENGINE WITH A SHORT-CIRCUITED ROTOR
DEMISHONKOVA S. A., DEMISHONKOV YA.V., KULIK T. I.**

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Development of a method and technical means for studying the characteristics of an induction motor with a short-circuited rotor using the voltage converter of the software-hardware complex.

Methodology. Investigation of the characteristics of an induction motor: start of motors at low voltage, experiments of idling, loading, short circuit. Determination of a number of various parameters of motors, obtaining of operating and other characteristics, consideration of different ways of regulation of rotation speed, etc.

Findings. Typical characteristics of an asynchronous motor with short-circuited rotor in different operating modes were determined, an overview of the most common complex stands for the study of asynchronous motors was performed, a comparative analysis of elements of the induction motor load was made. The characteristics obtained for the test engine are very similar to the standard characteristics of induction motors used in production and in laboratory stands.

Originality. The possibility of using a modernized stand with a special scheme of the voltage converter is substantiated. It will greatly increase the time of continuous operation of the three-phase motor and reduce the energy consumption.

Practical value. A stand for studying the characteristics of an induction motor with a short-circuited rotor using a voltage converter has been developed. This will allow to measure the insulation resistance of the windings relative to the casing and between the phases of the windings; to test the insulation of the windings for electrical strength, to continuously monitor its parameters. Due to its small size, economic and technical characteristics, this stand is easy to operate in the study of asynchronous motor in three-phase and single-phase modes, and promotes more modern and demonstrative learning.

Keywords: electric motor, experimental stand, software and hardware method, performance.

УДК 697.95

PAVLENKO V., VOLIANYK O.

Kyiv National University of Technologies and Design

INVESTIGATION OF RECUPERATOR EFFICIENCY USING IN RESIDENTIAL PREMISES

Purpose. Investigation of ventilation and conditioning systems for residential premises in order to ensure a healthy atmosphere and maintain a comfortable temperature in such premises.

Methodology. Analytical investigation of the ventilation systems, recuperation technologies which can be applied in residential premises.

Result. In this paper are considered the microclimatic features of residential premises and public premises. Constructions of air recuperators and air conditioning systems are explored. The possibility of using recuperator systems of heating and cooling for the observance of sanitary norms, determined for residential premises, is substantiated.

It is noted that in the case of using ventilation and air conditioning systems in residential areas, it is important to ensure the intensity of the input and output of air at various temperatures and natural conditions. In order to ensure the temperature regime, the observance of the required humidity of air and its speed in residential premises, it is proposed to use a plate recuperator and an appropriate control system. Calculations were made to compare the amount of energy consumed and its cost for the real consumer during the heating period.

Scientific novelty. An analysis of the calculations of tidal units with different types of heaters was conducted, and showed that the most effective way to heat the cold tidal air, to feed it into the room, is the electric heater in conjunction with the recuperator.

Practical significance. The functional scheme, the system of ventilation and air conditioning with the use of plate recuperators are developed, which is the basis for creation of experimental complexes and laboratory installations.

Key words: energy efficiency, energy-saving technologies, heat utilizers, life support systems, recuperation.

Introduction. One of the main characteristics of energy efficiency of buildings is considered to be the specific energy consumption of heating and ventilation systems per year. Unfortunately, we are significantly behind the majority of European countries from these indicators. Lowering the specific energy consumption of heating and ventilation systems can be predicted. Lack of massive construction of modern energy-saving technologies leads to high energy costs.

Setting problem. Considering the urgency of the issue ensuring the conditions of the internal environment in living premises, the research task is to evaluate the efficiency of using the heat recuperator to improve comfortable in-apartment conditions.

Results of the study. According to the applicable standards, premises for living in houses, apartments etc. should be equipped with heating, air conditioning, or forced and ventilated system.

In those kind of premises at homes, there are optimum parameters of the microclimate are to be ensured: temperature, relative humidity and air mobility in accordance with norms and rules [1].

According to [2], in home premises the air temperature should be 22-25° C, the relative humidity of the air - 40-60%, the speed of the air - not more than 0,1 m / s. When exceeding the permissible values, apartments and living premises should be immediately closed and provided urgent repair of ventilation systems.

In order to maintain the permissible values of the microclimate and the concentration of positive and negative ions, it is necessary to provide installations or devices for hydrating or artificial ionization, air conditioning. In Ukraine, there are no legally approved maximum levels of carbon dioxide in the air for personal, office and public buildings. However, taking into account its impact on residents, builders and landlords should pay attention to this issue and take preventive measures.

In addition, the result of modern technological advances is the growth of each year of power consumption and increase of the load on cables, which in turn leads to an increase in the intensity of electromagnetic fields, the adverse effects of which can lead to deterioration of the health of residents. Thus, builders and rental should be aware that the reason for the lower sales is very often because of the unsatisfactory microclimate parameters.

One of the high-tech aggregates that provide energy-saving are recuperative heat exchangers, the use of which represents a great practical interest as the most affordable means of introducing energy-saving technologies in the reconstruction of ventilation systems. The use of a recuperative heat exchanger is possible without replacing the main components of the existing ventilation system. Depending on the design, they are divided into plate, rotary, recirculation water recuperators [3].

Ventilation recuperator is a device in which the warm air, that is removed from the room, is heated by the cold air coming from the street. There are recuperators with copper plate or aluminum heat exchangers (coefficient of performance – 65-80%) and with regenerative ceramic plates (coefficient of performance – 75-91%). The disadvantage of plate heat exchangers is the complexity of manufacturing, respectively, a higher price, and regenerative - low performance. In summer, the use of a recuperator will reduce the need the installation of an air conditioner, or 2 to 5 times reduce the cost of electricity during its operation. In winter – it will significantly reduce the energy costs of heating the premises [4].

In fig. 1 shows the temperature of air in the recuperator.

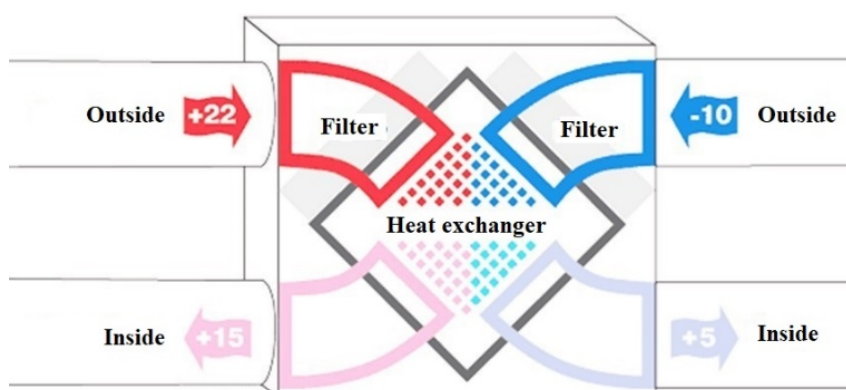


Fig. 1. Temperature and air flow in the recuperator

Heat exchange in the recuperator is carried out continuously through the wall separating the heat carrier. Plate recuperator - one of the types of air recuperators. It is the most popular, due to its simplicity of design and functioning. They transmit heat through their plates, which in turn heat up from passing through them warm air from the room and give it the heat of air flush. In this case, the air flows in the plate recuperators are completely sealed relative to each other. That is, they do

not mix air by transmitting heat through metal plates. The most popular materials for lamellar recuperators are aluminum, plastic, stainless steel and paper.

In fig. 2 shows the scheme of recovery efficiency.

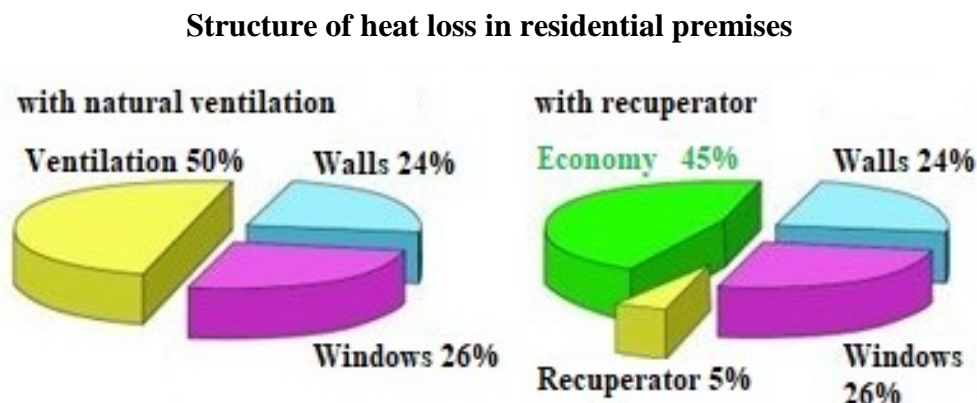


Fig. 2. Efficiency of the recuperator

Heat recovery in ventilation is a way of transferring heat energy from the flow of exhaust air to the flow of the tidal stream. Recuperation is used in the presence of a temperature difference between the removable and the inflow of air, to increase the temperature of fresh air. This process does not mean mixing air streams; the process of transferring heat occurs through any material.

In order to increase the efficiency of the lamellar recuperator of ventilation air, it is necessary to use its maximum possibilities for returning the heat of exhaust air at optimal operating modes [5].

Devices that carry out heat recovery heat recovery are called heat recuperators. Recuperator is a superficial type heat exchanger utilizing the heat of exhaust gases.

Rotary recuperator (Fig. 3) is structurally quite different from the plate. The main acting mechanism in it is a drum that rotates between the tidal and exhaust zones. Transmitting heat at the expense of rapid movement. This heat exchanger is heated by rotating in the zone of the exhaust duct, and then cooled in the area of the inflow channel. As a result, the heat from the exhaust air is transmitted to the tributary. Also, part of the moisture is returned as a result of condensation from the exhaust air and evaporation in the stream of tidal air from the street. It is more suitable for severe winter conditions, because due to constant rotation, the rotary recuperator does not have time to mist and it is not required to drain condensate [6].

Unlike lamellar, rotary recuperators show a high efficiency (70-85%), and also differ by a fairly high price. There are both for industrial and household applies.

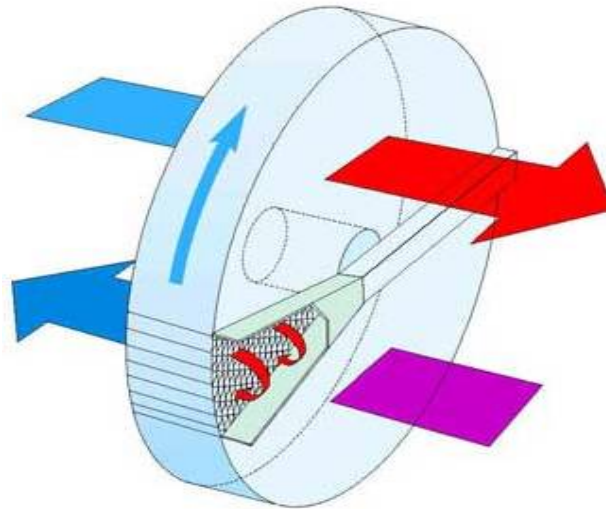


Fig. 3. Rotary recuperator

Let's consider the ventilation system, with a flow of 750 m³/hour. Calculations will be made for the heating period in Kyiv, Ukraine. Agreed that the duration of the period with the average daily temperature of air from +8 °C to -6,9 °C is 223 days. Calculate the required average thermal power. In order to heat the air from the street to a comfortable temperature of 20 °C, it will take:

$$N = G G_p p (t_{in} - t_m) = 750 \cdot 3600 \cdot 1,005 \cdot 1,247 \cdot [20 - (-6.9)] = 7,023 \text{ kWh}, \quad (1.1.)$$

where G – air flow (m³/hour);

t_{in} – comfortable air temperature of the room;

t_m – the minimum value of air temperature from the outside.

This amount of heat per unit time can be transmitted to the boost in several ways:

– heating of the inflow air by an electric heater;

– the heating of the fuel coolant is removed through the recuperator, with additional heating by an electric heater;

– heating the street air in a water heat exchanger, etc.

A. The inflow air is heated by an electric heater. Cost of electricity in Kyiv is S=1,68 UAH/(kWh). Ventilation works around the clock, during 223 days of the heating period, the amount of cash in this case will be:

$$C_1 = S \cdot 24 \cdot N \cdot n = 1.68 \cdot 24 \cdot 7.023 \cdot 223 = 63146 \text{ UAH}/(\text{heating season}), \quad (1.2.)$$

where S - price for electricity (kWh);

n - days of heating period.

B. Modern recuperators carry out the transfer of heat with high efficiency. Let the air be heated by the recuperator to 60% of the required heat. It follows that the electric heater consumes power:

$$N_{(el.heat)} = Q - Q_{(rec)} = 7,023 \cdot 0,6 = 2,81 \text{ kWh} \quad (1.3.)$$

where Q - amount of electricity for heating the air from the street to the premises (kWh);

$Q_{(rec)}$ - heating the air by recuperator (%).

Provided that the ventilation will work throughout the heating period, we will receive an amount for electricity:

$$C_2 = S \cdot 24 \cdot N_{(el.heat)} \cdot n = 1.68 \cdot 24 \cdot 2.81 \cdot 223 = 25265 \text{ UAH/ (heating season)} \quad (1.4.)$$

C. For heating the building it is used the water in a heat exchanger. Estimated cost of heat from technical hot water for 1 Gcal in Kyiv:

$$S_{h.w} = 834 \text{ UAH/Gcal,} \\ \text{kcal} = 4,184 \text{ kJ} \quad (1.5.)$$

For heating we will need the following amount of heat:

$$Q_{h.w.} = \frac{24 \cdot N \cdot 3600}{S_{h.w.} \cdot 106} \\ Q_{h.w.} = \frac{7,023 \cdot 223 \cdot 24 \cdot 3600}{4,184 \cdot 106} = 30,51 \text{ Gcal} \quad (1.6.)$$

When working with ventilation and heat exchanger during the heating period of the year, the amount of cash for the heat of technical water:

$$C_3 = S_{(h.w.)} \cdot Q = 834 \cdot 30.51 = 25445 \text{ UAH/ (heating season)} \quad (1.7.)$$

The results of calculations of expenses for heating of the inflow air during the heating season of the year are given in Table 1.

Table 1

Electrical heater	Electrical heater + Recuperator	Water heater
63146 UAH/(heating season)	25265 UAH/(heating season)	25445 UAH/(heating season)

The cross-accurate recuperative heat exchanger (Fig. 4), in which the air flows of the inflow and the exhausters are mixed, flow on numerous channels with common walls for different flows. For a plate type heat exchanger, the heat recovery according to various data can be from 40 to 70%, depending on the ratio of external costs and is removed, and the difference in temperature at the inputs to the heat exchanger. The air permeation at a given operating point of the fan is from 1 to 3%. A plate heat exchanger is manufactured, usually from aluminum plates, which create a system of channels. Exhaust air passes through each second channel of the heat exchanger and heats the plates, it forms. The tidal air passes through other channels and is heated when collided with heated exhaust air walls of the channels.



Fig.4. Plain recuperator

The modular design of heat exchangers allows you to combine the heat utilizer with any performance according to the specifications. Several heat exchangers can be installed in order to increase the heat utilization efficiency (one after another) [7]. The efficiency of the heat transfer process for heat exchangers is estimated by the relative temperature difference (temperature efficiency) for the exhaust and tidal air direction.

According to the results of the study, a functional diagram of the ventilation and air conditioning system (Fig. 5) was developed, in which there is an external temperature sensor, an inflatable air temperature sensor, a room temperature sensor, a plastic cross-type recuperator that provides a constant exchange of air and prevents excessive moisture, the appearance of mold, odors. Ventilation units ensure the purity and freshness of the air we breathe. Constant exchange of air significantly reduces the concentration of bacteria, dust and other harmful substances in the environment and increases the comfortable working conditions.

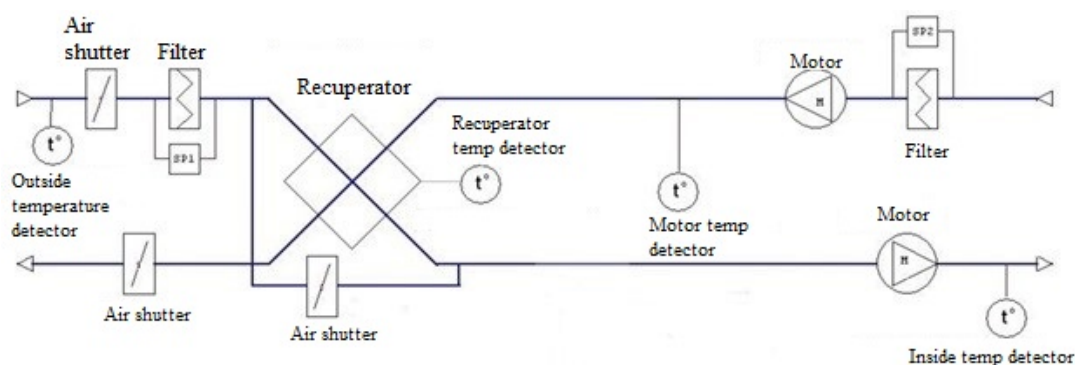


Fig. 5. Functional scheme of the ventilation and air conditioning system

In the general case, the following main components of the inflow and exhaust system are used:

- Two fans of different types that determine the cost of the installation.
- Heat exchanger recuperator - heats the tidal air through the transfer of heat from the removed.

- Electric heater - heats up the supply air to the required parameters, in the event of a lack of heat flow from the exhaust air.
- Air valves with electric drives - can be installed in front of the outlet ducts for additional airflow control and overlapping of the channel when the equipment is switched off.
- Bypass - due to which the air flow can be directed by the recuperator during the warm period of the year, thus not heating the tidal air, and submit it directly to the room.
- Recirculation chamber - ensures the mixing of air that is removed in the tributary, thereby ensuring air circulation recirculation

In addition to the main components of the inflow and exhaust system, it also includes a large number of small components, such as sensors, automation system for control and protection, etc.

Conclusions. At present, there are many factors that affect the comfortable stay of people in the premises. One of these factors is the temperature-humidity microclimate. Its maintenance requires high energy costs. Modern technology allows to reduce these costs by preserving, or even increasing efficiency. An analysis of the calculations of tidal units with different types of heaters showed that the most effective way to heat the cold tidal air, to feed it into the room, is the electric heater in conjunction with the recuperator. In addition, the amount of cash needed to heat the tidal air is significantly reduced, compared with the use of an electric or water heater.

The use of recuperators, together with other methods that increase energy efficiency, will save from 50 to 80% of the heat coming out of the room along with exhaust air. Efficiency of energy-saving technologies is sharply increased with the use of automatic climate control system in the room.

Література

1. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. Затверд. наказом Мінрегіонбуду від 25.01.2013 р. № 24.
2. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
3. Рекуперация воздуха: мода или необходимость? / Журнал АВОК «Вентиляция. Отопление. Кондиционирование», № 2, 2002.
4. Гершкович В. Ф. Плесень на окнах. Германский урок / Теплоэнергоэффективные технологии – Санкт-Петербург, 2004. – № 2, с. 44-45.
5. Назаров В. І. Побутові та автомобільні кондиціонери: довідник / В. І. Назаров, В. І. Рижинко. – М.: Видавництво Онікс, 2006. – 32 с.
6. Pavlenko V., Volianyk O. Efficiency of window recuperator in residential premises. / V. Pavlenko, O. Volianyk // *Mechatronic systems: innovations and engineering. III International conference.* Kyiv: KNUTD, 2019.
7. E. Klein. Two-stage heat recuperation system

References

1. DBN V.2.5-67:2013 Opalennia, ventylyatsiia ta kondytsionuvannia [Heating, ventilation and air conditioning] Zatverd. nakazom Minrehionbudu vid 25.01.2013 r. No. 24. [in Ukrainian];
2. DSN 3.3.6.042-99 Sanitarni normy mikroklimatu vyrobnychkh prymishchen [Sanitary norms of the microclimate of industrial premises] [in Ukrainian];
3. Rekuperatsiia vozdukh: moda yly neobkhodymost? (2002) [Air recuperation: a fashion or necessity?] *Zhurnal AVOK «Ventylyatsiia. Otoplenye. Kondytsionirovaniye»*, No. 2. [in Russian];
4. Hershkovych, V.F. (2004). Plesen na oknakh. Hermanskyi urok. [Energy saving in buildings] *Teploenergoeffektyvnye tekhnolohyy*, No. 2, [in Russian];
5. Nazarov, V.I. (2006). *Pobutovi ta avtomobilni kondytsionery: dovidnyk* [Household and automobile conditioners] Moscow: Oniks Publ. – 32 p. [in Ukrainian];
6. Pavlenko V., Volianyk O. (2019) Efficiency of window recuperator in residential premises. *Mechatronic systems: innovations and engineering. III International conference.* Kyiv: KNUTD. [in English];

in a semi-detached house with designed ground heat exchanger. *Zakład Klimatyzacji i Ogrzewnictwa*, 2018.

8. M. Basner, Single and Combined Effects of Air, Road, and Rail Traffic Noise on Sleep and Recuperation / M. Basner, U. Müller, E.-M. Elmenhorst // *Sleep*, Volume 34, Issue 1, January 2011.

9. W.M. Yang, Development of microthermophotovoltaic power generator with heat recuperation / W.M. Yang, K.J. // *Energy Conversion and Management*, Volume 78, 2014.

10. M. Aziz, Advanced energy saving in low rank coal drying based on self-heat recuperation technology / M. Aziz, Y. Kansha // *Fuel Processing Technology*, Volume 104, 2012.

7. Klein, E. (2018) Two-stage heat recuperation system with designed ground heat exchanger. *Zakład Klimatyzacji i Ogrzewnictwa*, [in English];

8. Basner, M, Müller, U, Elmenhorst, E.-M. (2011) Single and Combined Effects of Air, Road, and Rail Traffic Noise on Sleep and Recuperation, *Sleep*, Volume 34, Issue 1, [in English];

9. Yang, W.M., Chua, K.J. (2014) Development of micro-thermophotovoltaic power generator with heat recuperation. *Energy Conversion and Management*, Volume 78. [in English];

10. Aziz, M., Kansha, Y. (2012) Advanced energy saving in low rank coal drying based on self-heat recuperation technology, *Fuel Processing Technology*, Volume 104. [in English].

PAVLENKO VOLODYMYR

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2163-8508>

ResearcherID: B-7133-2017

Kyiv National University of Technologies & Design

VOLIANYK OLEKSII

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7278-0910>

ResearcherID: I-7967-2018

Kyiv National University of Technologies & Design

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ РЕКУПЕРАТОРІВ У ПОБУТОВИХ ПРИМІЩЕННЯХ

ПАВЛЕНКО В. М., ВОЛЯНИК О. Ю.

Київський національний університет технологій та дизайну

Мета. Дослідження систем вентиляції та кондиціонування житлових приміщень з метою забезпечення здорової атмосфери та підтримки комфортної температури в таких приміщеннях.

Методика. Аналітичне дослідження вентиляційних систем, технологій рекуперації, які можна застосовувати в житлових приміщеннях.

Результат. У даній роботі розглядаються мікрокліматичні особливості житлових приміщень та загального користування. Досліджено конструкції рекуператорів та систем кондиціонування повітря. Обґрунтовано можливість використання рекуператорних систем опалення та охолодження для дотримання санітарних норм, визначених для житлових приміщень.

Зазначається, що у разі використання систем вентиляції та кондиціонування у житлових приміщеннях важливо забезпечити інтенсивність введення та виведення повітря при різних температурах та природних умовах. Для забезпечення необхідних кліматичних умов, а саме: температурного режиму, дотримання необхідної вологості повітря та його швидкості в житлових приміщеннях пропонується використовувати пластинчастий рекуператор та відповідну систему управління. Були проведені розрахунки для порівняння кількості споживаної енергії та її вартості для реального споживача протягом опалювального періоду.

Наукова новизна. Проведено аналіз розрахунків припливних агрегатів з нагрівачами різних типів і показав, що найбільш ефективним способом нагрівання холодного припливного повітря, подачі його в приміщення, є електричний обігрівач спільно з рекуператором.

Практична значимість. Розроблено функціональну схему, систему вентиляції та кондиціонування із застосуванням пластинчатих рекуператорів, що є основою для створення експериментальних комплексів та лабораторних установок.

Ключові слова: енергоефективність, енергозберігаючі технології, відведення тепла, системи життєзабезпечення, рекуперація.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ
РЕКУПЕРАЦИИ В БЫТОВЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

ПАВЛЕНКО В. Н., ВОЛЯНИК А. Ю.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Исследование систем вентиляции и кондиционирования жилых помещений с целью обеспечения здоровой атмосферы и поддержания комфортной температуры в таких помещениях.

Методика. Аналитическое исследование вентиляционных систем, технологий рекуперации, которые можно применять в жилых помещениях.

Результат. В данной работе рассматриваются микроклиматические особенности жилых помещений и общего пользования. Исследована конструкции рекуператоров, систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Обоснована возможность использования рекуператорных систем отопления и охлаждения для соблюдения санитарных норм, которые определены для жилых помещений.

Отмечается, что при использовании систем вентиляции и кондиционирования в жилых помещениях важно обеспечить интенсивность ввода и вывода воздуха при различных температурах и природных условиях. Для обеспечения требуемых климатических условий, а именно: температурного режима, соблюдения необходимой влажности воздуха и его скорости в жилых помещениях предлагается использовать пластинчатый рекуператор и соответствующую систему управления. Были проведены расчеты для сравнения количества потребляемой энергии и ее стоимости для реального потребителя в течение отопительного периода для г. Киев, Украина.

Научная новизна. Разработана функциональная схема, которая описывает систему вентиляции и кондиционирования с применением пластинчатых рекуператоров, что является основой для создания экспериментальных комплексов и лабораторных установок.

Практическая значимость. Полученные результаты исследований могут быть использованы для разработки конструкций центробежных машин аналогичного типа для различных отраслей промышленности или бытового назначения.

Ключевые слова: энергоэффективность, энергосберегающие технологии, отвод тепла, системы жизнеобеспечения, рекуперация.

УДК 697.1

ДЕШКО В. І., СУХОДУБ І. О., СЕРДЕЧНИЙ П. Ю.

Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬ ПРИ РОЗРОБЦІ ПРОЕКТІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Мета. Дослідження проблематики різних типів проектів, які виконуються або можуть виконуватися студентами енергетичних спеціальностей з використанням програмного забезпечення для енергетичного моделювання будівель, нетрадиційних та відновлюваних джерел.

Методика. В процесі дослідження заявленої проблематики розглянуто приклади робіт, що використовують: математичне моделювання процесів теплообміну, енергетичні баланси та програмне забезпечення по моделюванню. Проаналізовано актуальну на сьогодні нормативно-правову базу України, яка описує та регламентує підходи до оцінки енергетичної ефективності будівель.

Результати. У ході дослідницької роботи розглянуто та проаналізовано типові проекти з підвищення рівня енергетичної ефективності будівель, що виконувалися або виконуються студентами енергетичних спеціальностей, з використанням таких програмних комплексів, як RETScreen, EnergyPlus, DesignBuilder і т.д., розглянуто технічний потенціал зазначеного програмного забезпечення, проаналізовано методи опрацювання вихідних даних для програм, наведені основні характеристики, переваги, недоліки та складнощі, з якими стикаються студенти при проведенні енергетичного моделювання будівель та аналізу результатів.

Наукова новизна. Систематизовано наявний досвід щодо проведення енергетичного моделювання будівель студентами та аналізу певних складнощів, які виникають при моделюванні, що дозволяє оптимізувати загальний процес проведення досліджень енергетичної ефективності будівель.

Практична значимість. В результаті проведення заявленого дослідження визначено потенціал використання різних програмних комплексів для навчання студентів енергетичного моделювання будівель та аналізу критеріїв енергетичної ефективності будівель в Україні.

Ключові слова. Енергетична ефективність будівель, енергетичне моделювання будівель, динамічні моделі, графічний інтерфейс.

Вступ. Існує велика кількість підходів до оцінки енергетичної ефективності будівель, що використовуються в Україні. Найбільш простим методом вважається стаціонарний підхід до розрахунку з використання градусо-днів, що раніше використовувався дуже широко, в тому числі для підготовки енергетичного паспорту об'єкту [1]. ДСТУ Б EN ISO 13790:2011 [2], що базується на європейському стандарті, надає методику розрахунку для використання помісячного квазістаціонарного метода, що ліг з основу при підготовці ДСТУ А.2.2-12:2015[3]. Останній стандарт наразі використовується як при визначенні класу енергетичної ефективності за енергопотребою згідно з ДБН В.2.6-31:2016 [4], так і при проведенні енергетичної сертифікації будівель за енергоспоживанням згідно з Законом України «Про енергетичну ефективність будівель» [5]. Також ДСТУ Б EN ISO 13790:2011 надає методику розрахунку для використання спрощеного погодинного метода, що більш детально враховує теплову інерційність будівель. Широке використання останнього підходу значно ускладнюється відсутністю погодинних нормативних кліматичних даних, що можуть бути використані при енергетичному моделюванні будівель [6]. Наразі, є два варіанти джерела кліматичних даних, що можуть надавати ці дані для міст України. Перший варіант – це

використовувати файл International Weather for Energy Calculations (IWEC), безкоштовна версія якого є для двох міст України (Київ та Одеса) [7]. Інший варіант – це отримувати кліматичні дані з програми Meteorom, що на жаль є платною [8].

Менш розповсюдженим підходом до оцінки енергетичної ефективності будівель на території України є динамічне енергетичне моделювання з використанням програмних комплексів EnergyPlus, TRNSYS, eQUEST, DesignBuilder та ін. [9, 10]. Кожна з цих програм має свої певні особливості, переваги та недоліки. Широке використання цих програмних комплексів в проектах з підвищення енергетичної ефективності існуючих громадських та житлових будівель ускладнюється значними затратами часу на створення енергетичних моделей і проведення досліджень. Тому, такі підходи в Україні більш часто використовуються для прийняття рішень на етапі попереднього проектування, оцінці вартості життєвого циклу будівель, при проведенні «зеленої» сертифікації будівель згідно міжнародних систем сертифікації LEED та BREEAM і т.д. [11, 12].

Постановка завдання:

1) Проаналізувати наявні програмні комплекси, що можуть бути використані для енергетичного моделювання будівель;

2) Навести приклади проектів, що виконувалися/виконуються студентами енергетичних спеціальностей з використанням програмних комплексів для енергетичного моделювання будівель.

Опис процесу дослідження. Для енергетичного моделювання будівель можуть використовуватися наступні програмні комплекси: RETScreen, EnergyPlus, TRNSYS, eQUEST, DesignBuilder та ін. Найбільш простим і доступним програмним комплексом для оцінки впровадження енергозберігаючих заходів в будівлях є RETScreen, що використовує помісячні кліматичні дані. Основною перевагою даної програми є простота використання, в той час як найбільш значним недоліком є використання стаціонарного методу розрахунку, що не враховує теплову інерційність будівлі. Серед закордонних науковців значного поширення набуло використання програми TRNSYS, що є однією з найбільш просунутих програм для динамічного енергетичного моделювання. Однак, її використання ускладнюється значними обмеженнями, що є у безкоштовній версії програми. Цей недолік не є притаманним програмі EnergyPlus, що також широко використовується в дослідженнях енергетичних характеристик будівлі, хоча вона не має власного безкоштовного графічного інтерфейсу. Тому для створення геометрії будівлі може використовуватися Google SketchUp з плагіном Open-Studio. До того ж, в самій програмі EnergyPlus досить складно створювати складні системи опалення, вентиляції та кондиціонування. В цьому випадку є доцільним використовувати платний графічний інтерфейс DesignBuilder з можливістю зручного створення геометрії, інженерних системи будівлі та задання її теплотехнічних характеристик. У випадку використання програми в навчальних цілях є можливість використовувати її безкоштовно протягом місяця з певними обмеженнями у кількості зон для аналізу.

Протягом останніх 5 років на кафедрі теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського впроваджувалося використання вказаних програмних продуктів в рамках викладання дисциплін «Прикладні задачі енергозбереження» та «Математичне моделювання енергетичних процесів в антропогенному середовищі». Остання дисципліна за згодою студентів може викладатися англійською мовою з використанням курсу, що був розроблений

GARD Analytics, Inc. та University of Illinois at Urbana-Champaign на базі програми EnergyPlus. Зважаючи на значну зацікавленість студентів у даних питаннях на кафедрі був організований науковий гурток «Програмні комплекси для моделювання енергетичних процесів в будівлях» (керівники – Суходуб І.О., Білоус І.Ю.). За цей період в рамках навчання та роботи в гуртку студенти виконали значну кількість проектів з використанням програмних комплектів для енергетичного моделювання. Тематика проектів включала як аналіз громадських (навчальні корпуси, школи, садочки, офісні будівлі) та промислових (цехи), так і житлових будівель (багатоквартирні будинки, гуртожитки). Найбільш поширені рішення, що аналізувалися в рамках проектів з підвищення енергетичної ефективності:

- Заходи щодо зменшення тепловтрат через огорожувальні конструкції будівлі (стіни, цоколь, дах, перекриття горища та підвалу, двері, світлопрозорі конструкції тощо);
- Модернізація системи опалення будівлі (балансування системи, радіатори з термостатичним регулюванням, індивідуальний тепловий пункт з погодозалежним керуванням тощо);
- Модернізація систем вентиляції з використанням механічних системи з теплоутилізацією (децентралізовані, централізовані);
- Модернізація системи освітлення з використанням засобів автоматичного регулювання відповідно до рівня природного освітлення (daylighting);
- Моделювання переривчастих режимів роботи системи опалення громадських та житлових будівель з різними джерелами тепlopостачання;
- Дослідження доцільності застосування різних типів систем з використанням поновлюваних та нетрадиційних джерел в громадських будівлях;
- Моделювання параметрів теплового комфорту будівель з різним рівнем теплового захисту та типом системи опалення.

Під керівництвом викладачів кафедри студенти займали призові місця на Всеукраїнських та Міжнародних конкурсах наукових робіт.

Результати дослідження. Процес використання програми DesignBuilder при аналізі проектів з підвищення енергетичної ефективності будівель розглянемо на прикладі школи №67, що розташована в Солом'янському районі м. Києва. Рік побудови об'єкту – 1963. Будівля закладу освіти виконана у Н-подібній формі з однією чотириповерховою (А) та двома одноповерховими секціями (Б та В) (рис. 1). Детальні відомості про площу огорожувальних конструкцій ЗОШ №67 наведені в табл. 1.



Рис. 1. Зображення школи №67. Вид зверху

Таблиця 1

Загальна інформація щодо огорожувальних конструкцій

Огородж. конструкція	Тип	Площа ОК, м ²	U, Вт/м ² ·К
Зовнішні стіни	Цегляні ЗС1	2132,54	0,831
	Цегляні ЗС2	930,9	0,999
Вікна	Металопластикові	458,94	1,88
	Дерев'яні	423,26	2,63
	Склоблоки	208,58	5,52
Двері	Дерев'яні	5,4	4,16
	Залізні	1,8	3,34
	Металопластикові	15,84	1,66
Дах	Над опалювальним приміщенням	1166,3	2,956
	Горище	1049	0,71
Підлога	-	6 411	-

Температурний режим під час опалювального сезону знаходиться в межах 13- 22°C, в залежності від типу приміщення та наявності додаткових опалювальних приладів. Станом на 2018 рік в школі навчається 540 учнів та працює 69 робітників. Загальноосвітній заклад №67 працює з 8:00 до 18:00. Опалення та гаряче водопостачання (ГВП) реалізуються централізовано. Встановлено 225 чавунних радіаторів. Термостатичні крани відсутні. Система тепlopостачання розбалансована. Труба, по якій відбувається розведення теплоносія по стояках потребує заміни. Індивідуальний тепловий пункт (ІТП) розташований за 44 метри від будівлі школи. Труби утеплені. ІТП знаходиться в справному робочому стані, всі, передбачені проектом, системи функціонують. Також ІТП обладнаний системою автоматичного регулювання подачі теплоносія. Енергетичне моделювання громадської будівлі було виконано в програмі RETScreen та DesignBuilder (базі розрахункового модуля EnergyPlus). Побудована 3-D геометрія енергетичної моделі будівлі наведено на рис. 2.

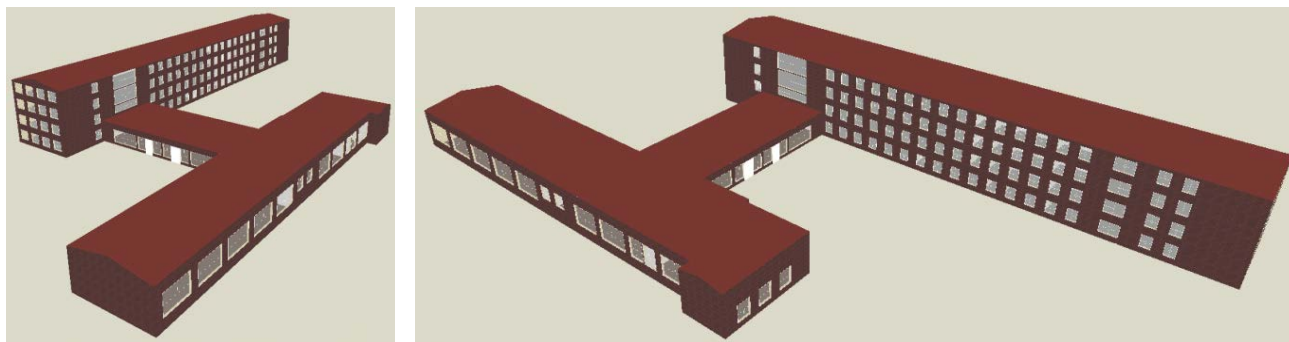


Рис. 2. Вигляд енергетичної моделі школи

Для верифікації/калібрування енергетичної моделі проводилося порівняння фактичних даних зі споживання енергоносіїв за останні три роки з результатами моделювання. Саме тому створювалися три моделі будівлі:

- Фактична модель – відображає існуючі температурні умови та повітрообмін
- Базова модель – умови комфортності та повітрообміну доведені до нормативних показників (з рахунок впровадження механічної системи вентиляції)
- Запропонована модель – теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій відповідають сучасним вимогам, використовується режим чергового опалення з періоди незайнятості будівлі, впроваджується система припливно-витяжної вентиляції з теплоутилізацією.

В програмі DesignBuilder для запропонованої моделі застосовувалася водяна система опалення та припливно-витяжна система вентиляції з теплоутилізацією (рис. 3).

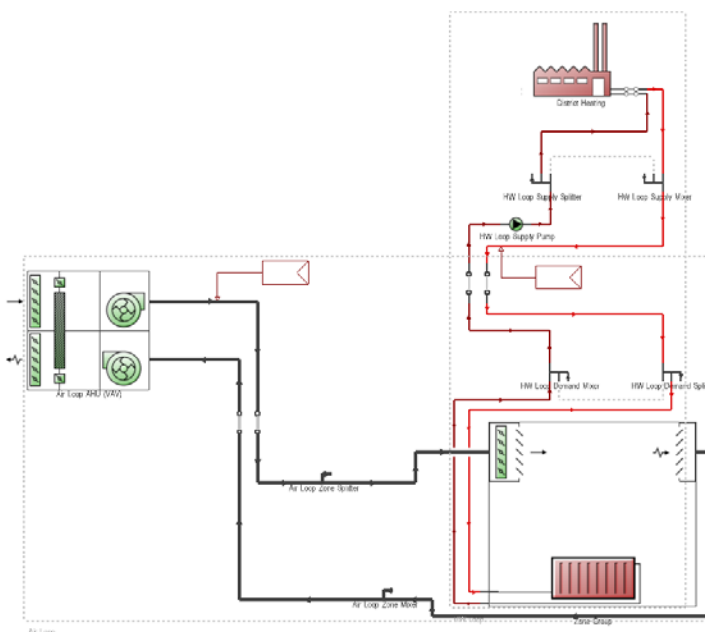
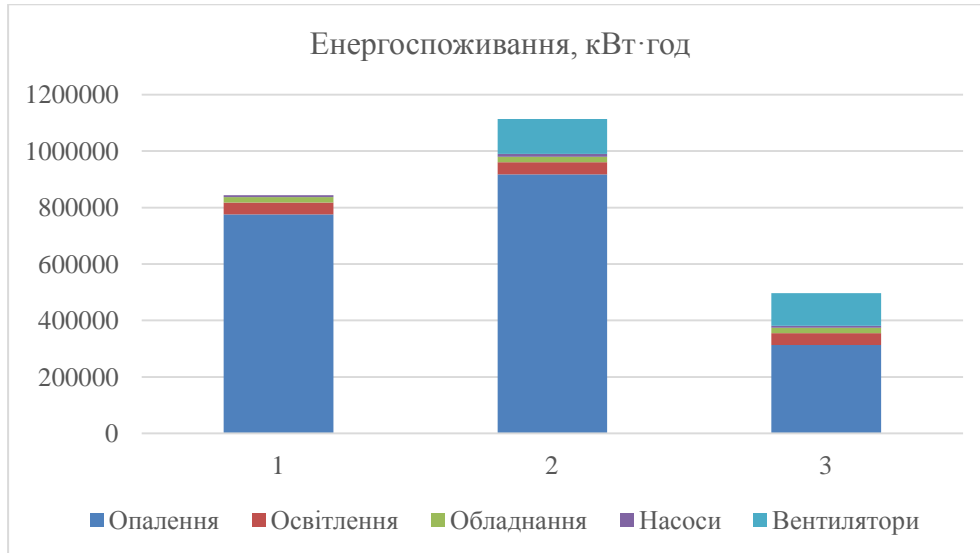


Рис. 3. Схема системи теплопостачання та запропонована система вентиляції з теплоутилізацією

Результати моделювання енергоспоживання на потреби опалення, освітлення, обладнання, насосів та вентиляторів для трьох моделей наведені на рис. 4. Для розрахунку

економії енергії при впровадженні проекту з підвищення енергоефективності доцільно порівнювати дані для базової та запропонованої моделей .В даному випадку загальне зниження енергоспоживання складає 55%.



1 – Фактична модель (actual), 2 – Базова модель (baseline), 3- Запропонована модель (proposed)

Рис. 4. Результати енергетичного моделювання

Для аналізу доцільності використання систем на базі поновлюваних джерел аналізувалися дві системи: сонячна електростанція на базі ФЕМ та система ГВП на базі сонячних колекторів.

Пропонується на даху чотириповерхової секції освітнього закладу встановити фотоелектричну систему, яка задовольнятиме частину енергопотреби школи та буде підключена до загальної електромережі для продажу електроенергії при її надлишку.

Моделювання сонячної електростанції було здійснено в програмі PV*SOL. Пропонується розмістити 138 модулів виробництва компанії AEG моделі AS-P605-280, під'єднаних до двох інверторів Fronius Symo 20.0-3-M. Панелі розташовані на південній половині скатного даху у три ряди під кутом 30° до горизонту (рис. 5).

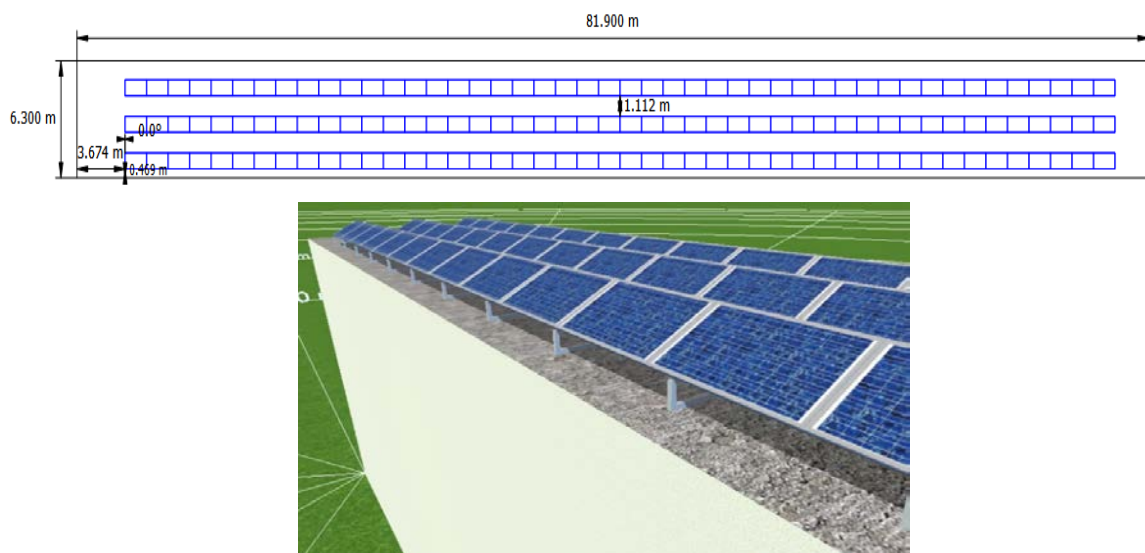


Рис. 5. Схема розташування сонячних панелей

Кінцеві результати симуляції роботи ФЕС наведені в табл. 2 та на рис. 6.

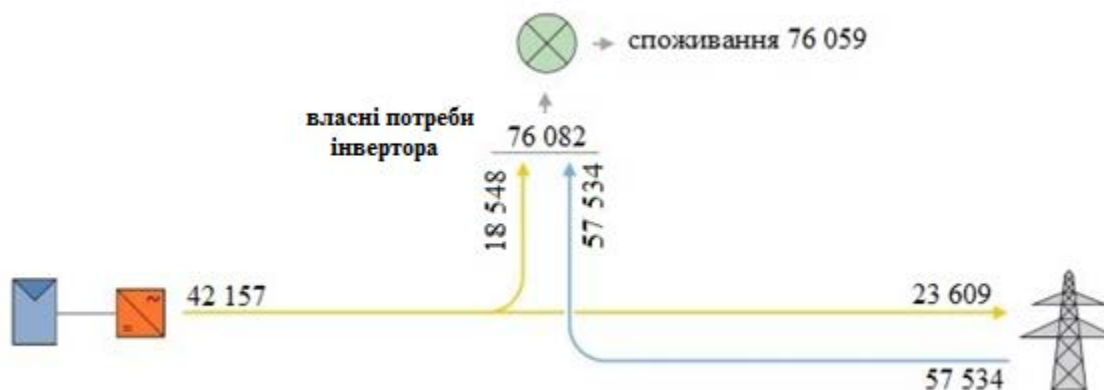


Рис.6. Баланс споживання та генерації електроенергії освітнім закладом

Таблиця 2

Характеристики встановленої сонячної електростанції

Параметр ФЕС	Характеристика
Вихідна потужність системи, кВт	38,6
Коефіцієнт продуктивності (PR), %	81,8
Негативний вплив затінення, %/рік	5,2
Річна генерація (мережа змінного струму), (кВт·год)/рік	42 157
Власне споживання, (кВт·год)/рік	18 548
Подача в загальну мережу, (кВт·год)/рік	23 609
Зниження викидів CO ₂ , кг/рік	25 294
Споживання в режимі очікування (інвертор), (кВт·год)/рік	23
Загальний обсяг споживання:	76 082
споживання від ФЕС	18 548
споживання від загальної мережі	57 534

Моделювання системи ГВП на базі сонячних колекторів було здійснено в програмі T*SOL. Пропонується розмістити 40 колекторів виробництва компанії Viessmann моделі Vitosol 100 -FM SH1F, під'єднаних до баку-акумулятору, який, у свою чергу, контактує з мережею централізованого водопостачання (рис. 7). Колектори розташовані на південній половині скатного даху під кутом 30° до горизонту.

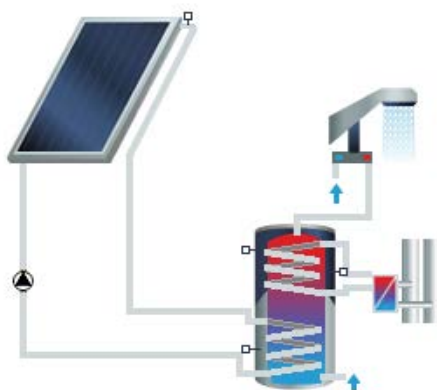


Рис. 7. Схема функціонування системи ГВП на базі сонячних колекторів

Кінцеві результати симуляції роботи СК наведені на рис. 8 та в табл. 3.

Таблиця 3

Характеристики встановленої системи СК

Параметр системи СК	Характеристика
Теплова потужність системи, кВт	70,28
Загальна площа поверхні колекторів, м ²	100,4
Частка заміщення централізованого ГВП, %/рік	25,8
Річна генерація теплоти, (кВт·год)/рік	36597,9
Ефективність роботи системи, %	28,5
Зниження викидів CO ₂ , кг/рік	8461

Solar energy consumption as percentage of total consumption

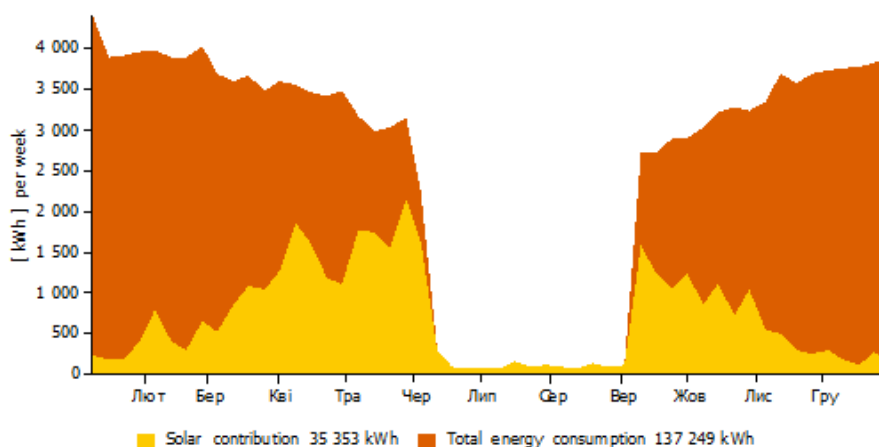


Рис. 8. Динаміка споживання теплоти освітнім закладом від СК та централізованим ГВП

Висновки. Серед значних переваг використання динамічного енергетичного моделювання для аналізу проектів з підвищення енергоефективності громадських та житлових будівель є врахування теплової інерційності масиву будівлі, погодинної зміни

кліматичних параметрів та змінних режимів роботи інженерних систем будівлі. Це в свою чергу значно підвищує точність такої оцінки. Серед основних проблем, з якими стикаються студенти під час створення моделей та проведення енергетичного моделювання, слід відмітити складність верифікації/калібрування моделі та налаштування інженерних систем будівлі. Разом з тим, навички з використання сучасних методів енергетичного моделювання будівель надають додаткові переваги молодим спеціалістам при працевлаштуванні.

Література

1. ДСТУ_Н Б А.2.2.5:2007. Проектування. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорту будинків при новому будівництві та реконструкції [Текст]. – Уведено вперше ; чинний від 2008.07.01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2008. – 44 с.
2. ДСТУ Б EN ISO 13790:2011. Енергоефективність будівель. Розрахунок енергоспоживання при опаленні та охолодженні [Текст]. – На заміну ГОСТ 26629.85; чинний з 01.01.2013. – К. : НДІБК, 2011. – 229 с.
3. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні / ДСТУ-Н Б А.2.2-12: 2015 [Національний стандарт України] – К.: Мінрегіон України, 2015, - 199 с.
4. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6–31:2016. – [Чинні від 2016–10–08, на заміну ДБН В.2.6–31:2006.] // Мінбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 2016. –33 с. – (Державні будівельні норми України)
5. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 р. №2118-VIII. Голос України. 2017. 22 липня. (№134)
6. Будівельна кліматологія: ДСТУ-Н Б В.1.1–27:2010. – [Чинні від 2011-11-01] // Мінрегіонбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 2011. – 123 с. – (Національний стандарт України).
7. Сайт з погодними файлами програмного забезпечення EnergyPlus [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://energyplus.net/weather-region/europe_wmo_region_6/UKR%20%20
8. Сайт з даними про сонячну радіацію [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://meteonorm.com/en/>
9. Crawley D. B. EnergyPlus: new capabilities in a whole-building energy simulation program /

References

1. Proektuvannia. Nastanova z rozroblennia ta skladannia enerhetychnoho pasporta budynkiv pry novomu budivnytstvi ta rekonstruktsii [Design. Guidelines for the development and preparation of energy passport of buildings for new construction and reconstruction]. (2007) DSTU-N B A.2.2.5:2007 from 7 July 2008. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].
2. Enerhoefektyvnist budivel. Rozrakhunok enerhospozhyvannia pry opalenni ta okholodzhenni [Energy efficiency of buildings. Calculation of energy consumption for heating and cooling]. (2011) DSTU B EN ISO 13790:2011 from 1 January 2013. Kyiv: NDIBK [in Ukrainian].
3. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osvittlenni ta hariachomu vodopostachanni [Energy performance of buildings. Method for calculation of energy use for space heating, cooling, ventilation, lighting and domestic hot water]. (2015) DSTU-N B A.2.2-12: 2015 – Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
4. Teplova izoliatsiia budivel [Thermal insulation of buildings]. (2016) DBN V.2.6–31:2016. Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
5. Pro enerhetychnu efektyvnist budivel. [About the energy efficiency of buildings]. Law of Ukraine (22.06.2017) №2118-VIII. Kyiv: Holos Ukrainy [in Ukrainian].
6. Budivelna klimatolohiia [Protection against the dangerous geological processes, harmful operational influences, against the fire. Building climatology]. (2010) DSTU-N B V.1.1–27: 2010 – Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
7. Sait z pohodnymy failamy prohramnoho zabezpechennia EnergyPlus [Website with weather files of EnergyPlus software]. Retrieved from: https://energyplus.net/weather-region/europe_wmo_region_6/UKR%20%20
8. Sait z danymy pro soniachnu radiatsiiu [Website with data on solar radiation]. Retrieved from: <https://meteonorm.com/en/>
9. Crawley D. B. EnergyPlus: new capabilities in a

D. B. Crawley, L. K. Lawrie [and others] // Seventh International IBPSA Conference (August 13-15, 2001, Rio de Janeiro)
10. DesignBuilder Simulation + CFD Training Guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.designbuilder.co.uk/training/online-learning/tutorials> - Назва з екрану.
11. Перспективи сертифікації житлових будівель по "зеленим" стандартам в Україні / Е. А. Тимошенко, Н. В. Савицький // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. - 2016. - № 4. - С. 26-34. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vpabia_2016_4_5
12. Дмитроченкова Е.І. Аналіз міжнародних систем сертифікації «зеленого» будівництва // Науково – практичний журнал «Екологічні науки». – К.: ДЕА. – 2018 – Вип. №1 (20). – С.140 – 143. ISSN : 2306 – 9716. – Режим доступу: http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2018/1/part_1/29.pdf

whole-building energy simulation program / D. B. Crawley, L. K. Lawrie [and others] // Seventh International IBPSA Conference (August 13-15, 2001, Rio de Janeiro)
10. DesignBuilder Simulation + CFD Training Guide. – Retrieved from: <https://www.designbuilder.co.uk/training/online-learning/tutorials>
11. E. A. Timoshenko & N. V. Savitskiy (2016). Perspektivy sertifikatsii zhilykh zdaniy po "zelenym" standartam v Ukraine [Prospects for certification of buildings according to the "green" standards in Ukraine]. Dnipro: Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vpabia_2016_4_5 [in Russian].
12. Dmytrochenkova E.I. (2018). Analiz mizhnarodnykh system sertyfikatsii «zelenoho» budvinytstva [Analysis of international building certification systems of the "green" construction]. Kyiv: Naukovo – praktychnyi zhurnal «Ekolohichni nauky». Retrieved from: http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2018/1/part_1/29.pdf [in Ukrainian].

DESHKO VALERY

Scopus Author ID: 6506189670

ResearcherID: J-6517-2017

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8218-3933>

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

SUKHODUB IRINA

Scopus Author ID: 57140834000

ResearcherID: JI-9788-2017

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5895-1306>

Department of Thermal Engineering and Energy Saving
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

SERDECHNYJ PAVLO

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТОВ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕШКО В. И., СУХОДУБ И. О., СЕРДЕЧНЫЙ П. Ю.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Цель. Исследование проблематики разных типов проектов, которые выполняются или могут выполняться студентами энергетических специальностей с использованием программного обеспечения для энергетического моделирования зданий и возобновляемых источников.

Методика. В процессе исследования заявленной проблематики рассмотрены примеры работ, которые используют: математическое моделирование процессов теплообмена, энергетические балансы и программное обеспечение по моделированию. Проанализировано актуальную на сегодня нормативно-правовую базу Украины, которая описывает и регламентирует подходы к оценке энергетической эффективности зданий.

Результаты. В ходе исследовательской работы рассмотрены и проанализированы типовые проекты повышения уровня энергетической эффективности зданий, которые выполнялись или выполняются студентами энергетических специальностей, с использованием таких программных комплексов, как RETScreen, EnergyPlus, DesignBuilder и т.д., рассмотрен технический потенциал указанного программного обеспечения, проанализированы методы обработки исходных

данных для программ, приведены основные характеристики, преимущества, недостатки и сложности, с которыми сталкиваются студенты при проведении энергетического моделирования зданий и анализа результатов.

Научная новизна. Систематизирован имеющийся опыт по проведению энергетического моделирования зданий студентами и анализе определенных сложностей, которые возникают при моделировании, что позволяет оптимизировать общий процесс проведения исследований энергетической эффективности зданий.

Практическая значимость. В результате проведения заявленного исследования определён потенциал использования различных программных комплексов для обучения студентов энергетическому моделированию зданий и анализа критериев энергетической эффективности зданий в Украине.

Ключевые слова. Энергетическая эффективность зданий, энергетическое моделирование зданий, динамические модели, графический интерфейс.

USE OF BUILDINGS ENERGY MODELING IN DEVELOPMENT OF ENERGY EFFICIENCY PROJECTS

DESHKO V. I., SUKHODUB I. O., SERDECHNYJ P. YU.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

Purpose. Research of the problems in different types of energy efficiency projects in public, residential and manufacturing facilities buildings that are or can be made by students of energy specialties with using dynamic energy modeling software for buildings and renewable energy sources.

Methods. In the process of researching the mentioned problems are considered examples of works using: mathematical modeling of heat transfer processes, energy balances and modeling software. The current Ukrainian legal base, which describes and regulates approaches for energy efficiency assessment of buildings, is analyzed also.

Results. In the course of the research typical projects for improving of the energy efficiency level of public, residential and manufacturing facilities buildings are considered, conducted by the students of energy specialties with using software packages such as RETScreen, EnergyPlus, DesignBuilder, etc., the technical potential of the mentioned software packages are analyzed, the methods of processing of input data for some programs are considered, the main characteristics, advantages, disadvantages and difficulties that students face in making of energy modeling and analysis of results are presented.

Scientific novelty. The existing experience of the energy modeling of buildings by students and the analysis of certain difficulties that arise in modeling is systematized, which allows to optimize the whole process of research of energy efficiency of buildings.

The practical significance. As a result of the stated research the potential of using different software complexes for student training in energy modeling of buildings and analysis of the criteria of the energy efficiency of buildings in Ukraine was determined.

Keywords. Energy efficiency of buildings, energy modeling of buildings, dynamic models, graphical interface.

УДК 620.91:697.1

ШЕВЧЕНКО О. М., ШОВКАЛЮК М. М.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ КАМПУС КНУТД: ІНСТРУМЕНТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мета. Створення та розвиток організаційної структури для управління енергоспоживанням студмістечок та підвищення відповідальної поведінки споживачів за рахунок їх залучення до операційної діяльності.

Методика. Розглядаються інжинірингові аспекти формування системи енергоменеджменту для різних типів кінцевих споживачів. Застосовуються загальнонаукові методи аналізу та синтезу, специфічні методи (групування, порівняння, узагальнення), техніко-економічний аналіз, експериментальні методи.

Результати. Зменшення загального споживання енергетичних ресурсів, а також грошових витрат на їх оплату; створення умов та інструментальної бази для науково-дослідницьких робіт; підвищення якості надання освітніх послуг, залучення студентів до виконання енергетичних обмежень.

Наукова новизна. Розвинуто комплексний підхід до поглибленого аналізу та планування енергоспоживання, удосконалено процедури оцінювання енергетичної ефективності будівель з урахуванням температурно-погодних та експлуатаційних факторів.

Практична значимість. Надані пропозиції щодо створення енергоефективного кампусу з використанням сучасних технологій та інноваційних рішень енергозабезпечення, енергомоніторингу, енергоменеджменту. Просвітницька мета проекту - залучення студентів до процесу створення та реалізації реальних інноваційних проектів з енергозабезпечення на прикладі кампусу, де вони навчаються. Це дозволить створити середовище, з комфортними умовами для проведення досліджень, навчання та життя. Реалізація комплексного проекту «Розумна мережа» дозволить показати, як можна створити на основі існуючого старого фонду будівель сучасний енергоефективний майданчик з використанням сучасних технологій та інноваційних рішень енергозабезпечення, енергомоніторингу, енергоменеджменту.

Ключові слова. енергоспоживання, кампус, студмістечко, енергетична ефективність, будівлі.

Вступ. Один із стратегічних напрямків розвитку економіки України - підвищення енергоефективності будівель житлово-громадської сфери, адже близько 40% світового енергоспоживання та третина викидів парникових газів припадає на будівлі. Комунальні витрати бюджетних установ в Україні є у 2–3 рази вищими, ніж подібні витрати в країнах ЄС. Практично 90% будівель України не відповідають сучасним вимогам енергоефективності, що призводить до перевитрат енергії на опалення та недотримання вимог по мікроклімату приміщень. Вирішення цих задач потребує розгляду процесів енергоспоживання будівель як комплексної проблеми з застосуванням сучасних інструментів системи енергоменеджменту.

У роботах [1,2] запропоновано удосконалення існуючих підходів до побудови систем управління процесами енергоспоживання та енергозбереження у галузі освіти. Основним завданням системи енергоменеджменту є управління ефективністю споживання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) шляхом здійснення обліку, контролю, планування, нормування та аналізу витрат, проведення внутрішніх енергетичних аудитів [3,4], впровадження енергозберігаючих заходів, а також інформування, стимулювання [5,6] та навчання

персоналу. Під час поглибленого аналізу теплового стану та оцінювання умов комфортності будівель можуть використовуватися математичні моделі [7].

Постановка завдання. Завдання дослідження полягає у поглибленні існуючих підходів до управління енергоспоживанням у студмістечках із залученням наукового потенціалу закладу.

Розвиток системи енергетичного менеджменту університету (СЕМ). Наразі в КПІ ім. І.Сікорського функціонує дворівнева СЕМ (рис. 1), що включає:

- рівень місцевого управління; об'єкт управління – енергетичне господарство університету. Склад служби: головний енергоменеджер, інженер за напрямком теплоспоживання, інженер за напрямком електроспоживання, інженер за напрямком водоспоживання, адміністратор АСКОЕ.

- рівень локального управління – здійснюється відповідальним за ефективне енерговикористання у будівлі (навчальний корпус/гуртожиток); об'єкт управління - системи тепло-, електро-, водоспоживання будівлі.

Кампус КПІ ім. Ігоря Сікорського налічує близько 50 будівель різного призначення, власними інженерними мережами, експлуатація та утримання яких вимагає значних витрат, які щорічно зростають (рис.2). При чому рівень споживання теплової енергії в університеті через режим жорсткої економії скоротився більше ніж у двічі. Якби рівень енергоспоживання відповідав показникам 2006 року, то з застосуванням сьогоденних тарифів частка комунальних витрат у бюджеті університету склала б 15,4%, а на сьогодні становить 7%. Впровадження подібної управлінської структури може бути здійснене і у інших кампусах або містах, де споживачами енергії є будівлі громадського та житлового призначення. Функціонування СЕМ передбачає: розробку енергетичної політики та програми енергоефективності, забезпечення діяльності підрозділів енергоменеджменту, оптимізацію планування витрат; аналіз та верифікацію показників, проведення енергетичних обстежень, моніторинг умов мікроклімату, енергетичну оцінку будівель, розробку заходів з енергозбереження з урахуванням технічних, економічних та екологічних показників та ін. Як показав досвід, створення умов та інструментальної бази для науково-дослідницьких робіт, залучення наукового потенціалу університету та студентів відповідних спеціальностей до виконання енергообстежень на базі об'єктів КПІ дозволяє підвищити якість освітніх послуг і зацікавленість кінцевих споживачів.

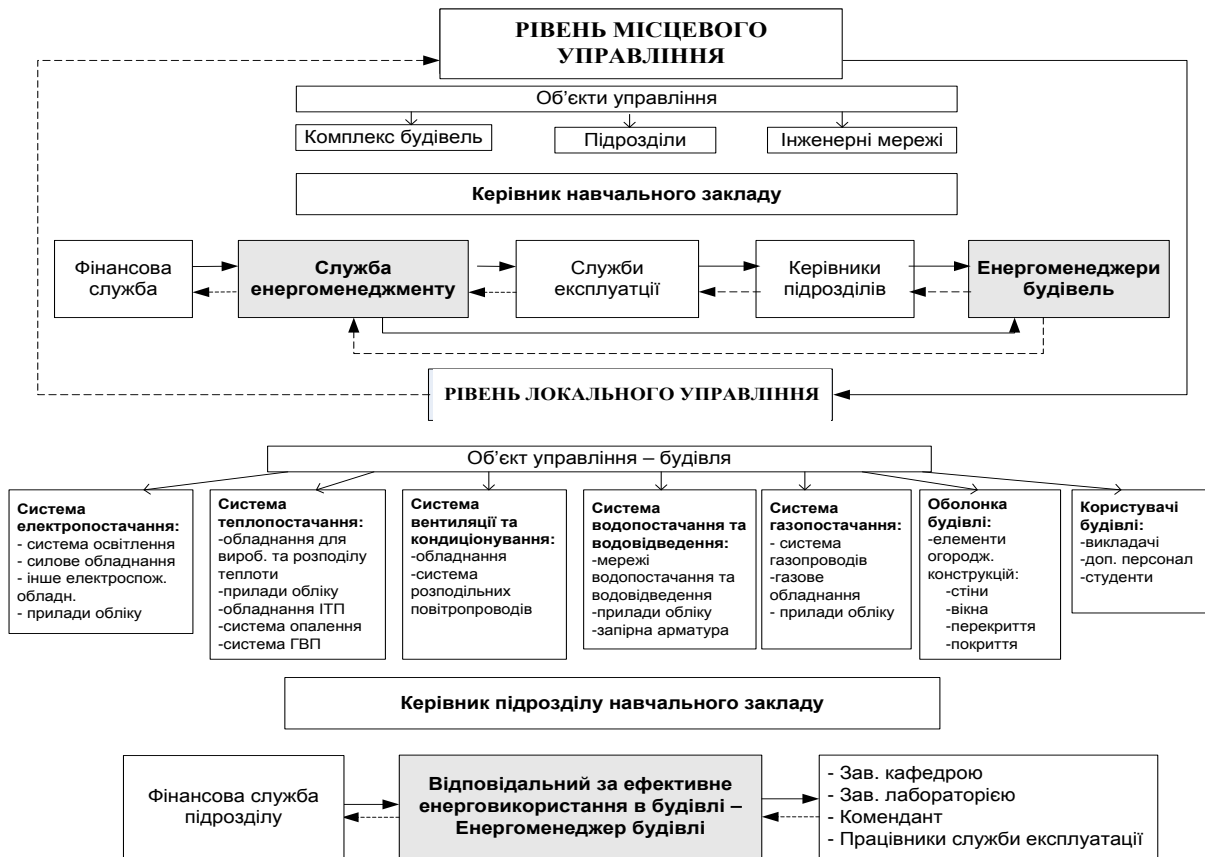


Рис.1 Дворівнева система енергоменеджменту КПІ ім.Ігоря Сікорського

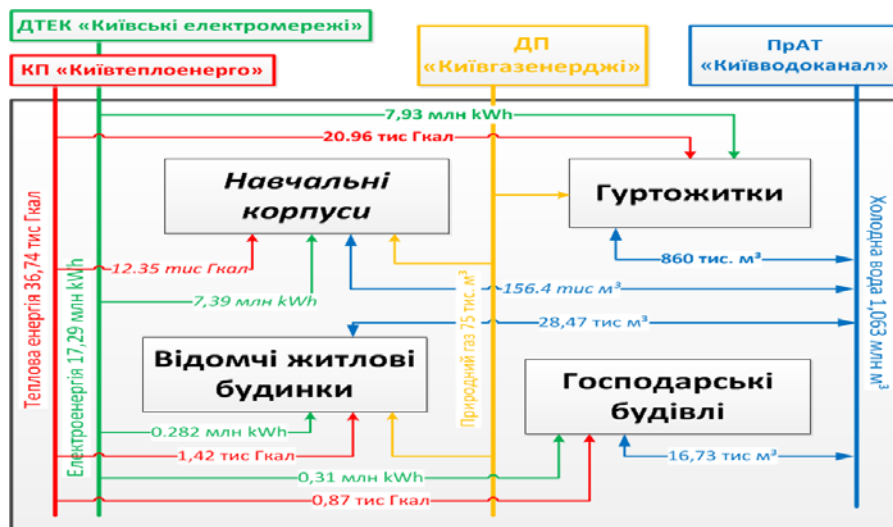


Рис. 1. Розподіл енергетичних потоків між споживачами КПІ ім. Ігоря Сікорського

Енергетичні обстеження будівель. Залучення інвестицій на комплексну термомодернізацію будівель неможливе без проведення якісного енергообстеження з визначенням енергетичних характеристик та розробкою економічно доцільних енергозберігаючих заходів. Під час викладання спеціальних дисциплін студенти ІЕЕ мають змогу виконувати експериментальні дослідження на реальних об'єктах, а переддипломну практику проходять у СЕМ. В ході досліджень під керівництвом викладачів та Голови Служби студенти:

- збирають вихідні дані по будівлі (характеристики огорожень, інженерних мереж та джерел енергії, режими експлуатації) та розраховують геометричні, теплотехнічні та енергетичні показники;
- визначають фактичне, базове (приведене до стандартних погодних умов та умов дотримання внутрішнього мікроклімату) та нормативне теплоспоживання та аналізують розподіл енергетичних та грошових витрат (рис.3);
- виконують інструментальні вимірювання та досліджують у зимовому та літньому режимах: теплові потоки на зовнішніх огороженнях, освітленість на робочих поверхнях, температуру поверхонь огорожень та температуру внутрішнього повітря, вологість повітря та концентрацію CO₂ (табл. 1, 2);
- виконують тепловізійну зйомку (під час опалювального періоду, рис.4);
- складають температурні карти (рис. 5,6) та за допомогою пірометра виконують виміри температури стояків та опалювальних пристроїв, аналізують ефективність роботи системи опалення будівель;
- досліджують ефективність роботи теплових пунктів будівель з вивченням характеристик обладнання, схеми підключення до теплових мереж міста та аналізом нормативного та фактичного теплового потоку, температурного графіку та витрат;
- розробляють енергетичний сертифікат будівлі Display (рис. 7);
- уточнюють перелік обладнання, що споживає енергію та складають баланси;
- пропонують економічно обгрунтовані заходи з енергозбереження (табл.3).

Таблиця 1

Параметри повітря під час занять у корпусі №5 (виміри 15.05.19)

Аудиторія	Фактична кількість людей	Температура зовнішнього повітря, °С	Температура внутрішнього повітря, °С	Вологість внутрішнього повітря, %	Концентрація CO ₂ , ppm
1	36	27	29,6	53	1350
2	20		29,3	50	1200
3	70		29,5	55	1700
4	50		29,0	51	1570

Таблиця 2

Нормативні параметри повітря в аудиторіях

Параметр		Нормативне значення
Температура повітря	Влітку	26 °С
	Взимку	19/20 °С
Вологість повітря	Для осушення	70%
	Для зволоження	20%
Концентрація CO ₂		800 ppm



Рис. 2. Аналіз споживання енергії та води навчальним корпусом №18
 а – холодна вода (на 1 особу), б – тепла енергія, в – електроенергія

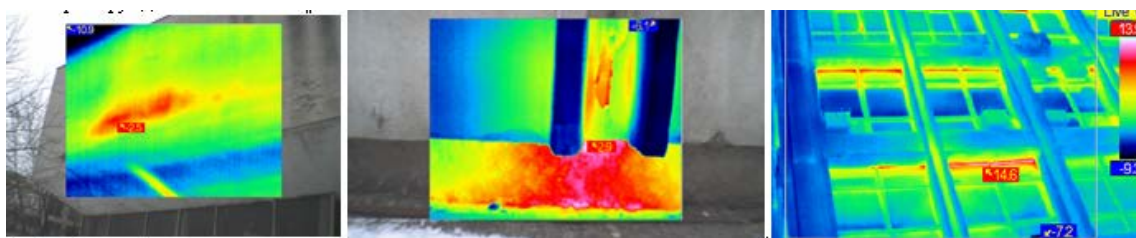


Рис. 3. Термографічне дослідження корпусу №18

- а-тепловтрати через конструктивні шви огорожень (містки холоду);
- б - тепловтрати через тріщини та оголення арматури, а також через фундаментні плити;
- в - тепловтрати за рахунок інфільтрації через нецільності віконних конструкцій

Температурна карта будівлі – один з інструментів, що використовують енергоменеджери у своїй діяльності для аналізу ефективності роботи системи опалення (синій колір - 16°C; блакитний - $16\div 18^{\circ}\text{C}$; зелений – $19\div 20^{\circ}\text{C}$). При цьому середня фактична внутрішня температура приміщень визначена як середньозважена по об'єму будівлі за формулою:
$$t_{\text{вн}} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i \cdot t_{\text{вн}i})}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

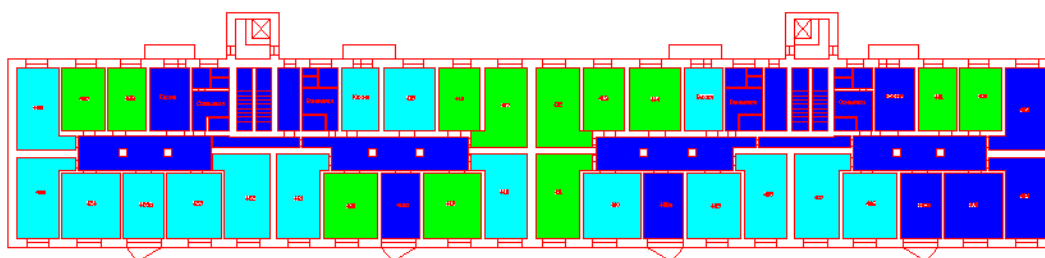


Рис. 4. Температурна карта 2-го поверху гуртожитку №16 (при $t_{\text{зовн}} = +1^{\circ}\text{C}$)



Рис. 5. Температурна карта 1 поверху корпусу №18 (при $t_{\text{зовн}} = -2^{\circ}\text{C}$)

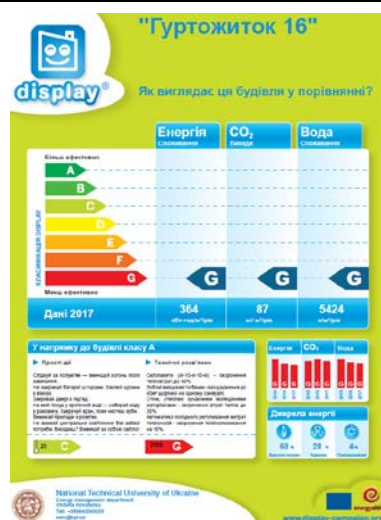


Рис. 6. Енергетичний сертифікат Display будівлі 16 гуртожитку КПІ

Таблиця 3

Таблиця показників заходів з енергозбереження у гуртожитку №16

№ з/п	Назва рекомендованого заходу	Капітальні інвестиції (тис. грн.)	Економія (тис. грн. на рік)* *з урах. експл. витрат	Простий термін окупності (років)	NPV (тис. грн.)	IRR (%)
1	Модернізація ГПП	700	228,11	3,07	2231	32%
2	Утеплення стін	3675	300,28	12,24	183	3%
3	Заміна вікон	2251,5	291,98	7,71	1500	10%
4	Утеплення даху	847,8	103,92	8,16	487	9%
5	Заміна ламп розжарювання на енергозберігаючі	12,39	114,4	0,11	1458	923%
6	Заміна люм. ламп ЛБ-40 на енергозберігаючі люм. лампи TLD-36	47,34	22,7	2,09	244	48%
7	Датчики руху в коридорах	30,6	33	0,93	393	108%
8	Чистка труб опалення	100	106,17	0,94	1264	106%
9	Модернізація сантехніки	452	245,28	1,84	2700	54%
	СУКУПНІ ПОКАЗНИКИ	8116,63	1445,84	5,61	10461	16%

Наукові дослідження на будівлях КПІ ім. Ігоря Сікорського. Також на об'єктах кампусу КПІ із застосуванням спеціалізованих програмних продуктів (SolidWorks, Fluent, EnergyPlus, DesignBuilder, Retscreen, Display, Statistica ін.) виконано ряд науково-дослідних робіт, присвячених:

- моніторингу та аналізу енергоспоживання фонду будівель;
- моделюванню теплових режимів приміщень з урахуванням теплових надходжень, різних джерел енергії та режимів експлуатації;
- моделювання теплових потоків з огорожень складної форми;
- прогнозуванню тепло-, енергоспоживання;
- розробці пакету енергозберігаючих заходів та їх економічній оцінці та ін.

В подальшому на базі Меморандуму про співпрацю між КПІ ім. Ігоря Сікорського, ВГО «Українська Федерація Індустрії Безпеки», ВГО «Український Союз пожежної та техногенної безпеки» та Громадською спілкою «ХАЙ ТЕК ОФІС Україна» в рамках проекту «Розумна мережа» планується створення центру компетенцій для моделювання, відтворення, розробки та впровадження розумної енергомережі на рівні систем розподілу енергії. Це передбачає проведення комплексної реновації пілотних будівель з забезпеченням показників ефективності; створення автоматизованого комплексу програмного та технічного забезпечення для:

- дистанційного обліку споживання ПЕР (тепло, ГВП, вода, електроенергія);
- збору інформації про аварійні ситуації;
- бази даних температур повітря всередині приміщень;
- створення автоматизованого робочого місця енергоменеджера
- створення автоматизованої просторової карти університету на базі ArcGIS.

Крім того, даний автоматизований комплекс може виступати одночасно дослідним майданчиком для проведення науково-дослідних робіт та впровадження інноваційних продуктів щодо моніторингу та управління енергоспоживанням з метою підвищення рівня енергоефективності. Для реалізації даного проекту доцільно залучити науковий потенціал закладу освіти, студентів та зацікавлені організації.

Висновки. У статті узагальнено досвід створення та функціонування в КПІ ім. Ігоря Сікорського системи енергоменеджменту, що інтегрована в загальну управлінську діяльність університету. Показано сферу залучення громади університету до виконання його енергетичної політики та перспективи розвитку енергоефективного кампуса КПІ в рамках проекту «Розумна мережа».

Література

1. Управління ефективністю енерговикористання у вищих навчальних закладах: монографія / І.Ю.Білоус, В.І.Дешко, І.О.Суходуб, Шевченко О.М., Шовкалюк М.М. – К.: Політехніка, 2015. – 188 с.
2. Типове положення про запровадження енергетичного менеджменту в навчальних закладах та установах МОНУ. – К.: НТУУ «КПІ» ІЕЕ, 2009 – 14с.
3. Розен В.П. Энергетический мониторинг зданий высших учебных заведений / В.П. Розен, В.Ф. Ткаченко // Проблемы региональной энергетики. Кишинев, 2013. – № 2. – с. 108–112.
4. Дешко В.І. Тепловий аудит будівель як обов'язкова складова системи енергетичного менеджменту / В.І. Дешко, О.Ю. Майстренко, В.Я. Євтухов та ін. // Новини енергетики. – №9. – 2011. – с.41-47.
5. Методика проведення енергетичного аудиту закладів освіти. Загальні

References

1. Bilous I.Yu., Dешko V.I., Sukhodub, O.M., Shevchenko I.O., Shovkaliuk M.M. (2015) *Upravlinnia efektyvnosti enerhovykorystannia u vyshchikh navchalnykh zakladakh: monohrafiia*. [Energy efficiency management in higher education institutions: monograph]. Kyiv: Politekhnikha [in Ukrainian].
2. Typove polozhennia pro zaprovadzhennia enerhetychnoho menedzhmentu v navchalnykh zakladakh ta ustanovakh MONU (2019) [A typical provision for the implementation of energy management in educational establishments and institutions of MESU]. Kyiv [in Ukrainian].
3. Rozen V.P., Tkachenko V.F. (2013). *Enerhetycheskyi monytorinh zdanyi vysshikh uchebnykh zavedenyi* [Energy monitoring of buildings of higher educational institutions]. *Problemy rehyonalnoi enerhetyky – Problems of regional energy*, 2, 108–112 [in Russianian].
4. Dешko V.I., Maistrenko O.Yu., Yevtukhov V.Ya. (2011). *Teplovyi audyt budivel yak обов'язкова складова systemy enerhetychnoho menedzhmentu* [Thermal audit of buildings as a mandatory component of the energy management system]. *Novyny enerhetyky – Energy News*, 9, 41–47 [in Ukrainian].
5. *Metodyka provedennia enerhetychnoho audytu zakladiv*

положення. Порядок проведення. – К.: НТУУ «КПІ» ІЕЕ, 2009. – 74с.

6. Свідоцтво авторського права на науковий твір "Положення про систему мотивації ошадливого енерговикористання підрозділами ВНЗ", №55959 від 06.08.2014р.

7. Євтухов В.Я. Інформаційна та мотиваційна складові системи енергетичного менеджменту об'єктів галузі освіти / Євтухов В.Я., Дешко В.І., Шовкалюк М.М., Шевченко О.М. // Новини енергетики. – 2018. – №5. – с.10-23.

8. Дешко В.И. Моделирование теплового состояния помещений при изменении режимных параметров отопления / В.И.Дешко, М.М.Шовкалюк, А.В.Ленькин // Промышленная теплотехника. Т.31, №6. – 2009. – с.75-80.

9. Басок Б.И. Особенности теплоснабжения административных зданий в отопительный период / Б.И. Басок, Б.В. Давиденко, С.М. Гончарук, О.Н.Лысенко, А.А. Лунина, А.И. Тесля, А.Н. Недбайло, М.В. Ткаченко// Керамика: наука и жизни – 2011. – №4(14). – С. 59-68.

10. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.

osvity. Zahalni polozhennia. Poriadok provedennia [Methods of conducting energy audits of educational institutions. Terms. The order of holding]. Kyiv [in Ukrainian].

6. Cvidotstvo avtorskoho prava na naukovyi tvir «Polozhennia pro systemu motyvatsii oshchadlyvoho enerhovykorystannia pidrozdilamy VNZ» [Certificate of copyright for the scientific work «Regulations on the system of motivation of economical energy use by departments of higher education institution»], №55959 from 06.08.2014. Kyiv [in Ukrainian].

7. Yevtukhov V.Ya., Deshko V.I., Shovkalyuk M.M., Shevchenko O.M. (2018). Informatsiina ta motyvatsiina skladovi systemy enerhetychnoho menezhmentu ob'iektiv haluzi osvity [Information and motivational components of the energy management system of objects of education]. *Novyny enerhetyky – Energy News*, 5, 10–23 [in Ukrainian].

8. Deshko V.I., Shovkaliuk M.M., Lenkin A.V. (2009). Modelyrovanye teplovoho sostoiannya pomeshchenyi pry yzmenenyy rezhymnykh parametrov otopleniya [Simulation of the thermal state of rooms when changing heating parameters]. *Promyshlennaia teplotekhnika – Industrial Heat Engineering*, Vol. 31, 6, 75–80 [in Russianian].

9. Basok B.I., Davidenko B.V., Goncharuk S.M., Lysenko O.N., Lunina A.A., Teslya A.I., Nedbaylo A.N., Tkachenko M.V. (2011). Osobennosti teplosnabzheniya administrativnykh zdaniy v otopitelnyy period [Features heating office buildings in the heating period]. *Keramika: nauka i zhizni – Ceramics: Science and Life*, 4(14), 59-68 [in Ukrainian].

10. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M. (2002). Matematycheskoe modelyrovanye y optymyzatsiya teplovoi efektyvnosti zdanyi [Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of buildings]. Moscow [in Russianian].

OLENA SHEVCHENKO

Scopus Author ID: 55839779200

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9304-5432>

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

SHOVKALIUK MARYNA

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1898-3493>

Department of Thermal Engineering and Energy Saving

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ КАМПУС КПИ: ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

ШЕВЧЕНКО Е. Н., ШОВКАЛЮК М. М.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игора Сикорского»

Цель. Создание и развитие организационной структуры для управления энергопотреблением студенческих городков и повышения ответственного поведения потребителей за счет их вовлечения в операционную деятельность.

Методика. Рассматриваются инженеринговые аспекты формирования системы энергоменеджмента для различных типов конечных потребителей. Применяются общенаучные

методы анализа и синтеза, специфические методы (группировка, сравнение, обобщение), технико-экономический анализ, экспериментальные методы.

Результаты. Уменьшение общего потребления энергетических ресурсов, а также денежных затрат на их оплату; создание инструментальной базы для научно-исследовательских работ; повышение качества предоставления образовательных услуг, привлечение студентов к выполнению энергетических обследований.

Научная новизна. Развито комплексный подход к углубленному анализу и планированию энергопотребления, усовершенствована процедура оценки энергетической эффективности зданий с учетом температурно-погодных и эксплуатационных факторов.

Практическая значимость. Представлены предложения по созданию энергоэффективного кампуса с использованием современных технологий и инновационных решений энергообеспечения, энергомониторинга, энергоменеджмента. Просветительская цель проекта - привлечение студентов к процессу создания и реализации реальных инновационных проектов энергообеспечения на примере кампуса, где они учатся. Это позволит создать среду, с комфортными условиями для проведения исследований, обучения и жизни. Реализация комплексного проекта «Умная сеть» позволит показать, как можно создать на основе существующего старого фонда зданий современную энергоэффективную площадку с использованием современных технологий и инновационных решений энергообеспечения, энергомониторинга, энергоменеджмента.

Ключевые слова: энергопотребление, кампус, студгородок, энергетическая эффективность, здания.

KPI ENERGY EFFICIENT CAMPUS: TOOLS AND RESEARCH METHODS SHEVCHENKO O.M., SHOVKALIUK M.M.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Purpose. Creation and development of organizational structure for managing campus energy consumption and enhancing responsible consumer behavior through their involvement in operational activities.

Methods. The engineering aspects of an energy management system formation for various types of end consumers are considered. General scientific methods of analysis and synthesis are used, specific methods (grouping, comparison, generalization), technical and economic analysis, experimental methods.

Results. Reducing the total consumption of energy resources, as well as cash costs for their payment; creation of a tool base for research work; improving the quality of educational services, engaging students in energy audits.

Scientific novelty. An integrated approach to in-depth analysis and planning of energy consumption was developed, the procedure for assessing the energy efficiency of buildings taking into account temperature, weather and operational factors was improved.

The practical significance. Proposals for creating an energy-efficient campus using modern technologies and innovative solutions for energy supply, energy monitoring, energy management are presented. The educational goal of the project is to attract students to the process of creating and implementing real innovative energy supply projects using the example of the campus where they study. This will create an environment with comfortable conditions for research, education and life. Realization of the complex project "Smart Network" will show how it is possible to create a modern energy efficient platform based on the existing old building stock using modern technologies and innovative solutions of energy supply, energy monitoring, energy management.

Keywords: energy consumption, campus, campus, energy efficiency, buildings.

<https://doi.org/DOI:10.30857/1813-6796.2019.4.11>

УДК 677.075

АРАБУЛІ С. І., АРАБУЛІ А. Т., ОТОТЮК С. С.,
КЛОЧКО В. В., ЧЕРЕПЕНКО Д. Ю.

Київський національний університет технологій та дизайну

ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ КОМФОРТНОСТІ БІЛИЗНЯНИХ ТРИКОТАЖНИХ ПОЛОТЕН ДЛЯ ЗАНЯТЬ СПОРТОМ

Мета. Визначення показників комфортності білизняних трикотажних полотен для занять спортом та порівняння традиційних білизняних полотен з інноваційними полотнами для термобілизни.

Методика. У статті наведений аналіз сучасного асортименту текстильних матеріалів для білизни, проаналізовані останні розробки щодо створення термобілизни. При проведенні експериментальних досліджень використані сучасні методи визначення показників комфортності одягу та фізичних властивостей текстильних матеріалів. Експериментальні дослідження базуються на основних положеннях текстильного матеріалознавства.

Результати. Наведено сучасні підходи до створення спортивного одягу. Розглянуто основні технологічні рішення «пошарової концепції» спортивного одягу. Проаналізовано основні чинники формування сучасного асортименту білизняних текстильних матеріалів для занять спортом. Основна увага приділена найбільш технологічним полотнам, які одержали назву «термобілизна». Наведений аналіз показників комфортності як традиційних білизняних полотен, так і інноваційних полотен, на прикладі трикотажного полотна CoolMax®.

Наукова новизна. Систематизовано дані щодо показників термофізіологічного та сенсорного комфорту білизняних текстильних матеріалів різної будови та сировинного складу. Експериментально доведено, що асортимент традиційних текстильних матеріалів, які на сьогодні використовують для виготовлення білизни, не може забезпечити належний рівень комфортності одягу для занять спортом. Виявлено специфіку та всебічно охарактеризовано гігієнічні властивості полотна CoolMax®, які зумовлені чотириканальною формою поліефірного волокна.

Практична значимість. Обґрунтовано доцільність використання полотна CoolMax® для натільної білизни.

Ключові слова: білизняні трикотажні полотна, термофізіологічний комфорт, сенсорний комфорт, термобілизна.

Вступ. Сучасний спорт високих досягнень давно вже став спортом високих технологій. Усі інновації у повсякденному одязі для занять спортом «переходять» з одягу для професійних спортсменів. На сьогодні, в світі широко вживана, так звана «пошарова концепція» спортивного одягу [1]. Перший шар сприяє оптимізації мікроклімату тіла, вологообміну та швидкому висиханню шкіри. Як перший шар виступає спортивна білизна. Другий шар (за наявності) – (ізоляційний) дозволяє ізолювати тепло і гарантувати оптимальний мікроклімат всередині і зовні. Основне його завдання – зберігати тепло, а також відводити вологу до наступного (зовнішнього шару одягу). Третій шар – зовнішній, захищає від неприємного впливу зовнішніх факторів (наприклад, дощу, вітру або снігу). Завдання третього шару – не пропускати вологу ззовні, захищати від вітру, «дихати». Кожен рівень у комбінації шарів виконує свою спеціальну функцію, одночасно взаємодіючи з іншими рівнями. Для забезпечення ефективності системи всі її шари повинні максимально взаємодіяти один з одним. Ергономічна система шарів і спеціальне поєднання матеріалів забезпечують максимальний комфорт і повну свободу рухів спортсменів.

Постановка завдання. Особливий інтерес являють собою текстильні полотна для білизняного шару. Найбільш технологічними є полотна, які одержали назву «термобілизна».

Термобілизна призначається для низького і середнього рівня фізичної активності при спекотній, прохолодній, холодній чи дуже холодній температурі зовнішнього середовища, що дозволяє використовувати її під час занять різними видами спорту. Термобілизна має безліч переваг порівнянно зі звичайною білизною [2]. Вона зберігає/віддає теплову енергію тіла, не вбирає в себе і виводить зайву вологу, не створюючи тим самим відчуття дискомфорту. Усі матеріали для термобілизни можна розділити на групи: зігріваючі, утеплюючі, охолоджуючі та ізоляційні (захисні). У кожній з вказаних груп постійно з'являються інноваційні матеріали. До охолоджуючих матеріалів відносять спеціально розроблені текстильні матеріали для швидкого виведення вологи з поверхні шкіри людини. До цієї групи матеріалів відносяться: PolarTec®, CoolMax®, Supplex®, Tactel® та інше. Основною функцією цих полотен є управління випаровуванням, тобто матеріал має відвести вологу від тіла, щоб створити відчуття комфорту, та не витратити енергію на нагрівання і випаровування вологи (Рис. 1).

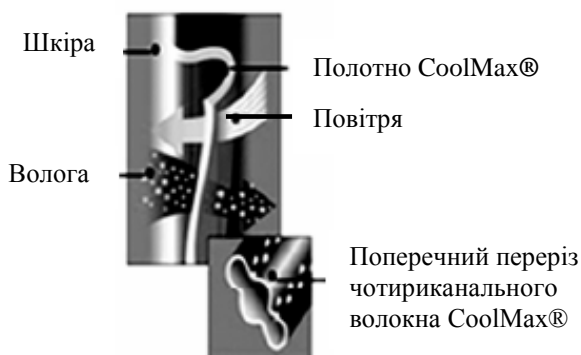


Рис.1. Механізм тепло-, масопереносу через полотно CoolMax® [2]

Враховуючи вище викладене, метою роботи є проведення порівняльного аналізу показників комфортності традиційних білизняних полотен з інноваційними полотнами для термобілизни, на прикладі трикотажного полотна CoolMax®.

Матеріали та методи дослідження. Предмет дослідження – білизняні текстильні матеріали різного сировинного складу та структурних характеристик (табл.1 та Рис.2). Як традиційні білизняні полотна використані: бавовняне трикотажне полотно – «Pq»; змішане трикотажне полотно – «Sp»; віскозне трикотажне полотно – «Vi». Як інноваційне охолоджуюче полотно – поліефірне трикотажне полотно CoolMax® – «CM».

Таблиця 1

Структурні показники білизняних трикотажних полотен

Умовне позначення	Вміст складників сировинного складу, [%]	Лінійна густина ниток, [текс]	Поверхнева густина, [г/м ²]	Товщина, [мм]	Кількість петельних рядів та стовпчиків у 100 мм	
					N_p	N_c
Pq	Бавовна – 100	19,1	207	0,82	245	120
Sp	Бавовна – 33 ПЕ – 67	21,3	195	0,76	250	120
Vi	Віскоза – 100	20,8	210	0,52	245	160
CM	ПЕ – 100	20,0	190	0,58	170	125

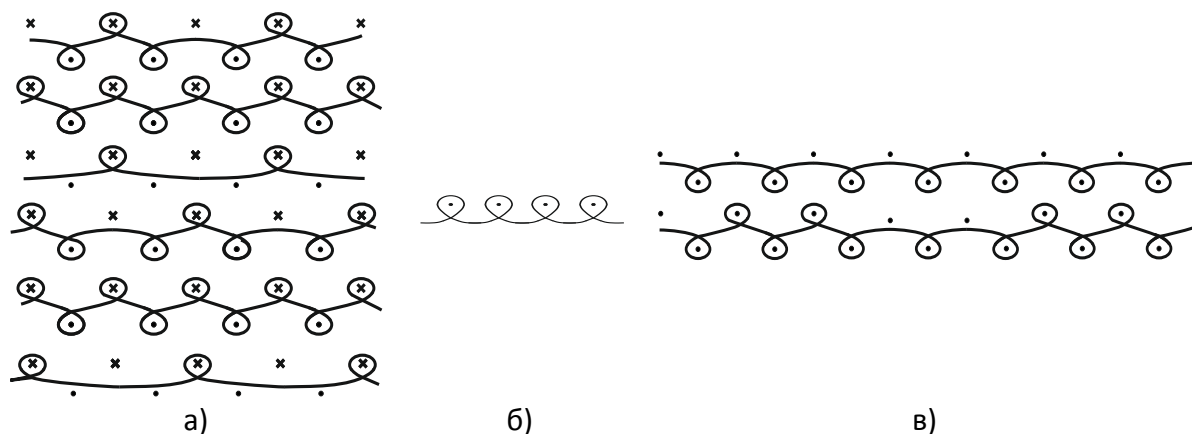


Рис.2. Графічний запис переплетення дослідних зразків трикотажу:
а – Pq, Sp; б – Vi; в – CM

CoolMax® – це високотехнологічне трикотажне полотно, виготовлене зі спеціально сконструйованого поліефірного волокна, яке має на 20% більшу площу поверхні, ніж традиційні круглі волокна (рис.3). Рис. 3 ілюструє чотириканальні волокна, що утворюють систему, яка відводить вологу від шкіри до зовнішнього шару полотна. Повітря проходить через канали і створює ефект «прискореного сушіння». За даними Swantko [3] та Dupont [4] виробни, виготовлені з матеріалу CoolMax® вимагають мінімального догляду, стійкі до стирання, прання, при цьому, залишаються м'якими, приємними на дотик та зберігають попередню форму та гарний зовнішній вигляд.

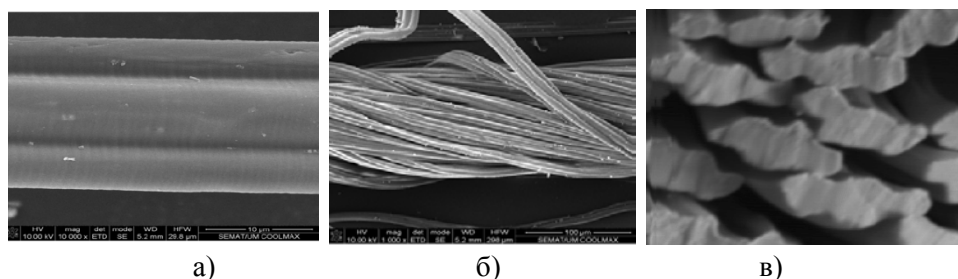


Рис. 3. SEM знімки [5, 6]: а – CoolMax® волокно; б – CoolMax® пряжа;
в – поперечний переріз CoolMax® пряжи

Для оцінки гігроскопічних властивостей полотен визначено показники: кондиційна вологість, водовбиральність, гігроскопічність та капілярність. Для оцінки капілярності полотен при їх горизонтальному положенні використано показник «площа розтікання води по поверхні матеріалу» [7].

Коефіцієнт повітропроникності визначено на приладі FF-12 за методикою ДСТУ ISO 9237:2003.

Паропроникність текстильних полотен оцінено за декількома показниками:

– відносна паропроникність, [%] полотен досліджена на приладі «PERMETEST» виробництва Чеської Республіки (Рис.4, а) [8];

– опір потоку водяної пари, $[m^2 \cdot Pa / Вт]$, паропровідність, $[г/м^2 \cdot год \cdot Па]$ досліджені методом «потіючої теплої пластини» (ДСТУ ISO 11092:2005) на приладі SGHP-8.2 (США) (Рис.4, б) [9];

– коефіцієнт паропроникності, $[г/м^2 \cdot год]$ визначено «методом склянки», а саме «методом сорбенту» – метод за яким, перенесення пари здійснюється з зовнішнього середовища у склянку (Рис.4, в) [8].

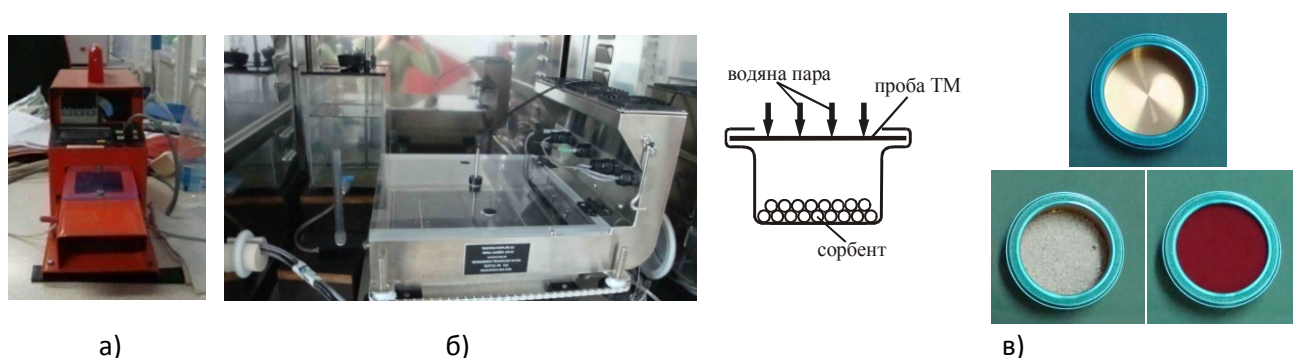


Рис. 4. Зовнішній вигляд приладів для визначення паропроникності текстильних матеріалів: а – «PERMETEST» (Чеська Республіка); б – SGHP-8.2 (США); в – схема визначення паропроникності за «методом сорбенту»

Вимірювання теплофізичних характеристик білизняних текстильних матеріалів здійснено на приладі «ALAMBETA» виробництва Чеської Республіки [10], (Рис.5) при перепаді температур $10^{\circ}C$ и тиску на пробу $P = 200$ Па.



Рис.5. Зовнішній вигляд приладу «ALAMBETA» (Чеська Республіка)

Результати досліджень. Комфорт натільної білизни має два основних аспекти – термофізіологічний і сенсорний комфорт. Перший стосується здатності тканин до поглинання і розсіювання метаболічного тепла і вологи, тоді як останній відноситься до взаємодії матеріалу з органами почуттів користувача, особливо з тактильною реакцією шкіри на зміну теплоти і вологості. Враховуючи вище викладене, дослідження включає комплекс показників, які всебічно характеризують комфортність білизни.

Досліджувані полотна мають різну здатність до поглинання вологи із оточуючого середовища (табл.2). З наведених даних видно, що на сорбційні властивості полотен впливає тільки їх сировинний склад. Аналіз здатності полотен до водовбирання вказав, що поліефірне полотно CoolMax® має водовбиральність на рівні 200%, що близька до водовбиральності бавовняно-поліефірного полотна «Sp». Як правило, полотна з целюлозних волокон відрізняються більш високою здатністю до водовбирання у порівнянні з полотнами з

синтетичних волокон. Збільшення здатності полотна CoolMax® до водовбирання можна пояснити чотириканальною формою поліефірного волокна. В свою чергу, встановлено, що час висихання досліджених полотен не має прямого зв'язку з величиною їх водовбиральності, а є функцією спорідненості полімеру волокон до води. Так, судячи з отриманих даних (табл.1), при значній водовбиральності полотна CoolMax®, полотно має високу швидкість висихання.

Показник «капілярність» (K , мм) передбачає оцінювання капілярних властивостей матеріалів, які розташовані вертикально (табл.3), тобто характеризує здатність полотен вбирати воду поздовжніми капілярами. Але умови експлуатації білизняних полотен відрізняються від дослідних. Виходячи з цього додатково оцінено капілярність полотен при їх горизонтальному розташуванні. Величина та форма площі розтікання води по поверхні матеріалу дає змогу безпосередньо судити про рівень їх капілярності в різних напрямках. З досліджуваних полотен найкращі капілярні властивості мають полотна «Sp» та «CM».

Таблиця 2

Гігроскопічні показники білизняних трикотажних полотен

Умовне позначення	Вміст складників сировинного складу, [%]	Кондиційна вологість (24 години) W_k [%]	Гігроскопічність, H [%]		Водовбиральність, P_g [%]	Час висихання, τ [хв]
			4 години	24 години		
Pq	Бавовна – 100	4,5	10,3	14,5	270	37
Sp	Бавовна – 33 ПЕ – 67	1,7	3,6	4,7	215	20
Vi	Віскоза – 100	8,8	14,9	17,0	140	27
CM	ПЕ – 100	0,3	0,7	1,3	207	13

Таблиця 3

Капілярність та площа розтікання води по поверхні білизняних трикотажних полотен

Умовне позначення	Вміст складників сировинного складу, %	Капілярність, K [мм]	Умовний діаметр розтікання води, l_{vm} [мм]	Площа розтікання води, S [мм ²]
		в поздовжньому напрямку / в поперечному напрямку	в поздовжньому напрямку / в поперечному напрямку	
Pq	Бавовна – 100	177 / 175	47 / 44	1650±20
Sp	Бавовна – 33 ПЕ – 67	171 / 185	59 / 67	3100±55
Vi	Віс – 100	134 / 134	41 / 49	1590±40
CM	ПЕ – 100	105 / 106	40 / 78	2730±60

Капілярні та гігроскопічні властивості білизняних полотен є важливими, але недостатніми для характеристики комфортності одягу. Повітропроникність та паропроникність є визначальними. Аналіз отриманих даних (табл. 4) дає підставу очікувати,

що найменш комфортні умови експлуатації пакету одягу створюються при використанні як білизняного шару традиційних полотен з використанням традиційної сировини: віскоза, бавовна, ПЕ/Бавовна. Ці полотна мають високий опір потоку водяної пари, що призводить до низької паропровідності та паропроникності. Адаже для цих полотен значення коефіцієнта паропроникності є найменшими, і змінюється в межах від 77,8 г/м²год до 97,8 г/м²год. Таким чином, білизна з цих полотен буде перешкоджати проходженню парів вологи від тіла людини у оточуюче середовище, що призведе до накопичення парів вологи у підодяговому шарі та викличе неприємні відчуття, намокання прилеглого шару, та погіршить теплозахисні властивості виробу. Найбільше значення паропроникності (103,0 г/м²год) зафіксовано при використанні трикотажу «СМ», який завдяки своїй високій повітропроникності та чотириканальній формі поліефірного волокна має кращу паропровідність. Використання полотна «СМ» у білизняних виробах забезпечить постійну відносну вологість повітря у підодяговому шарі та створить комфортні умови для життєдіяльності організму.

Таблиця 4

Проникні властивості білизняних трикотажних полотен

Умовне позначення	Вміст складників сировинного складу, [%]	Коефіцієнт повітропроникності, Q , [дм ³ /м ² с]	«Метод потіючої теплої пластини», Прилад «SGHP-8.2»		Прилад «Permetest»	«Метод склянки»
			Опір потоку водяної пари, R_{eT} , [м ² ·Па/Вт]	Паропровідність, W_b , [г/м ² ·год·Па]	Відносна паропроникність, P [%]	Коефіцієнт паропроникності, [г/м ² год]
Pq	Бавовна – 100	710	2,80	0,531	20,7	80,8
Sp	Бавовна – 33 ПЕ – 67	1340	3,01	0,494	22,1	77,8
Vi	Віскоза – 100	650	4,19	0,355	25,5	97,8
	ПЕ – 100	більше 2000	2, 2 4	0,66 5	26,9	103,0

Зазвичай здатність текстильних полотен проводити та поглинати тепло характеризують теплопровідністю, тепловим опором, температуропровідністю. Аналіз даних табл.5 показав, що полотно CoolMax® має кращі теплозахисні властивості порівняно з традиційними полотнами, що робить його придатним для використання у якості термобілизни. Але перелічені теплофізичні показники не здатні всебічно охарактеризувати відчуття комфорту людини. За результатами останніх досліджень, теплофізичні характеристики доповнилися новим показником – коефіцієнтом теплового поглинання b , [Вт·с^{1/2}/м²·К]. Цей показник характеризує теплове відчуття людини при доторканні до текстильного матеріалу. Зі збільшенням його числового значення – підвищуються неприємні холодові відчуття людини при торканні поверхні текстилю. З результатів дослідження видно, що теплішим на дотик є полотно CoolMax®.

Таблиця 5

Теплофізичні показники білизняних текстильних матеріалів

Умовне позначення	Вміст складників сировинного складу, [%]	Товщина, h , [мм]	Тепловий опір, $R \cdot 10^{-3}$, [Вт ⁻¹ ·К·м ²]	Коефіцієнти		
				тепло-провідності $\lambda \cdot 10^{-3}$, [Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹]	температуро-провідності $a \cdot 10^{-6}$, [м ² ·с ⁻¹]	теплого поглинання b , [Вт·с ^{1/2} /м ² ·К]
Pq	Бавовна – 100	0,82	12,4	65,9	0,150	171
Sp	Бавовна – 33 ПЕ – 67	0,76	12,7	59,9	0,149	155
Vi	Віскоза – 100	0,52	8,0	65,2	0,071	245
CM	ПЕ – 100	0,58	13,0	44,7	0,098	144

Висновки. Одержані результати дають підставу вважати, що використання сучасних синтетичних білизняних текстильних матеріалів у якості термобілизни в системі «людина – одяг – оточуюче середовище» є виправданим та забезпечує комфортність виробу. Аналіз сучасного асортименту текстильних матеріалів для термобілизни дозволив виділити полотно CoolMax®, яке за рахунок своєї структури (чотириканальна форма поліефірного волокна), має водовбиральні властивості на рівні з традиційними бавовняними трикотажними полотнами, при цьому забезпечує високу швидкість висихання. Одночасно з цим, полотно забезпечує високі паропроникні та теплозахисні властивості. Комплекс перелічених характеристик і дозволяє забезпечити постійну відносну вологість повітря у підодяговому шарі та створити комфортні умови для життєдіяльності організму людини під час занять спортом.

Література

1. Учебно-методическое пособие по дисциплине «Инновации в индустрии моды» / сост. Н.А. Крюкова – Тольяти: Изд-во ПВГУС, 2016. – 52 с.
2. Manshahia M., Das A. High active sportswear – A critical review. *Indian Journal of Fibre & Textile Research* Vol. 39, December 2014, pp. 441-449.
3. Swantko K. *America sportswear and knitting times*, Vol.68. №1 – 1999, P.12-16.
4. Dupont: *Dupont Magazine*. Vol. 93, №2 – 1999, P.26-28.
5. Elena Onofrei, Ana Maria Rocha, André Catarino, Guimaraes Braga. The Influence of Knitted Fabrics' Structure on the Thermal and Moisture Management Properties. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, Volume 6, Issue 4 – 2011, pp. 10 – 22.
6. B. G. Gabr1, A. A. Salem 2 and Y. E. Hassan, Thermo-Physiological Comfort of Printed CoolMax Fabrics. *6th International Conference of Textile Research Division*, NRC, Cairo, Egypt, April 5 – 7, 2009, *Textile Processing: State of the Art & Future Developments*, pp.

References

1. Uchebno-metodicheskoe posobie po distcipline «Innovacii v industrii mody» [The training manual on the discipline "Innovation in the fashion industry"] sost. N.A. Kriukova – Toliati: Izd-vo PVGUS, 2016. – 52 p. [in Russian].
2. Manshahia M., Das A. High active sportswear – A critical review. *Indian Journal of Fibre & Textile Research* Vol. 39, December 2014, pp. 441-449. [in English].
3. Swantko K. *America sportswear and knitting times*, Vol.68. №1 – 1999, P.12-16.
4. Dupont: *Dupont Magazine*. Vol. 93, №2 – 1999, P.26-28. [in English].
5. Elena Onofrei, Ana Maria Rocha, André Catarino, Guimaraes Braga. The Influence of Knitted Fabrics' Structure on the Thermal and Moisture Management Properties. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, Volume 6, Issue 4 – 2011, pp. 10 – 22. [in English].
6. B. G. Gabr1, A. A. Salem 2 and Y. E. Hassan, Thermo-Physiological Comfort of Printed CoolMax Fabrics. *6th International Conference of Textile Research Division*, NRC, Cairo, Egypt, April 5 – 7, 2009, *Textile Processing: State of the Art & Future Developments*, pp.

NRC, Cairo, Egypt, April 5 – 7, 2009, *Textile Processing: State of the Art & Future Developments*, pp. 302 – 308.

7. Ковтун С.І. Розробка та дослідження текстильних композиційних матеріалів для виробів медичного призначення: Дис. к.т.н: 05.02.01/ КНУТД. – К., 2007. – 218с.

8. Арабулі С.І. Порівняльний аналіз методів визначення паропроникності текстильних матеріалів. *Вісник КНУТД*. 2017. № 3 (110). С. 32 – 40.

9. DSTU ISO 11092:2005 Матеріали текстильні. Оцінювання фізіологічного впливу. Вимірювання теплового опору та водо-, паронепроникності в установленому режимі (методом виділення вологи на захищеній гарячій пластинці) с.14.

10. Hes L., Dolezal I. Indirect measurement of moisture absorptivity of functional textile fabrics. *XXII World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO 2018) IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1065 (2018)*.

302 – 308. [in English].

7. Kovtun S.I. Rozrobka ta doslidzhennia tekstyl'nykh kompozytsiinykh materialiv dlia vyrobiv medychnoho pryznachennia [Elaboration and investigation of textile composite materials for medical application products]: Dys. k.t.n: 05.02.01/ KNU TD. – Kyiv, 2007. – 218p. [in Ukrainian].

8. Arabuli S.I. Porivnialnyi analiz metodiv vyznachennia paropronyknosti tekstyl'nykh materialiv. *Visnyk KNU TD*. 2017. № 3 (110). P. 32 – 40. [in Ukrainian].

9. DSTU ISO 11092:2005 Materialy tekstyl'ni. Otsiniuvannia fiziologichnoho vplyvu. Vymiriuvannia teplovoho oporu ta vodo-, paronepronyknosti v ustanovlenomu rezhymi (metodom vydilennia volohy na zakhyshchenii hariachii plastyntsi) [Textiles — Physiological effects — Measurement of thermal and water-vapour resistance under steady-state conditions (sweating guarded-hotplate test)] p.14. [in Ukrainian].

10. Hes L., Dolezal I. Indirect measurement of moisture absorptivity of functional textile fabrics. *XXII World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO 2018) IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1065 (2018)*. [in English].

ARABULI SVITLANA

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1049-8255>

Department of Technology and Design of Textile
Materials,

Kyiv National University of Technologies & Design

ARABULI ARSENI

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-4998>

Department of technology and design of sewing
products ,

Kyiv National University of Technologies and Design

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОМФОРТНОСТИ БЕЛЬЕВЫХ ТРИКОТАЖНЫХ ПОЛОТЕН ДЛЯ ЗАНЯТИЙ СПОРТОМ

АРАБУЛИ С. И., АРАБУЛИ А. Т., ОТОТЮК С. С., КЛОЧКО В. В., ЧЕРЕПЕНКО Д. Ю.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Определение показателей комфортности бельевых трикотажных полотен для занятий спортом и сравнения традиционных бельевых полотен с инновационными полотнами для термобелья.

Методика. В статье приведен анализ современного ассортимента текстильных материалов для белья, проанализированы последние разработки по созданию термобелья. При проведении экспериментальных исследований использованы современные методы определения показателей комфортности одежды и физических свойств текстильных материалов. Экспериментальные исследования базируются на основных положениях текстильного материаловедения.

Результаты. Приведены современные подходы к созданию спортивной одежды. Рассмотрены основные технологические решения «послойной концепции» спортивной одежды. Проанализированы основные факторы формирования современного ассортимента бельевых текстильных материалов для занятий спортом. Основное внимание уделено наиболее технологичным полотнам, которые получили название «термобелье». Представлен анализ показателей комфортности как традиционных бельевых полотен, так и инновационных полотен, на примере трикотажных CoolMax®.

Научная новизна. Систематизированы данные по показателям термофизиологического и сенсорного комфорта бельевых текстильных материалов различного строения и состава. Экспериментально доказано, что ассортимент традиционных текстильных материалов, которые сегодня используются для изготовления белья, не может обеспечить надлежащий уровень комфортности одежды для занятий спортом. Выявлена специфика и всесторонне охарактеризованы гигиенические свойства полотна CoolMax®, обусловленные четырехканальной формой полиэфирного волокна.

Практическая значимость. Доказана целесообразность использования полотна CoolMax® для нательного белья.

Ключевые слова бельевые трикотажные полотна, термофизиологичний комфорт, сенсорний комфорт, термобелье.

EVALUATION OF COMFORT PROPERTIES OF KNITTED FABRICS FOR SPORTWEAR

ARABULI S. I., ARABULI A. T., OTOTIUK S. S., KLOCHKO V. V.,
CHEREPENKO D. Yu.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Determination of comfort properties of knitted underwear for sports and comparison of traditional and innovative underwear for thermal underwear.

Methodology. The article provides an analysis of the modern range of textile materials for underwear, analyzes the latest developments in the design of thermal underwear. The modern methods have been used to determine clothing comfort and physical properties of textile materials. Experimental studies are based on the basic principles of textile materials science.

Findings. Modern approaches to the design of sportswear are presented. The basic technological solutions of the "layered concept" of sportswear are considered. The main factors of the formation of a modern range of underwear for sports were analyzed. The main attention is paid to the most technologically advanced textiles, which are called "thermal underwear". The analysis of comfort properties of traditional and innovative underwear's, is presented on the example of CoolMax®.

Originality. The data of thermophysiological and sensory comfort properties of textile materials of various structures and compositions has been systematized. It has been experimentally proved that the assortment of traditional textile materials that are used today for the manufacture of underwear cannot provide an appropriate level of comfort for sportswear. The hygienic properties of the CoolMax® fabric, which are due to the four-channel polyester fibers, are comprehensively characterized.

Practical value. The feasibility of using CoolMax® for underwear has been proven.

Keywords: underwear knitted fabrics, thermophysiological comfort, sensory comfort, thermal underwear.