

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ВІСНИК

КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Серія «Технічні науки»

№ 4 (124), 2018

DOI:10.30857/1813-6796.2018.4

Наукове фахове видання

Періодичність виходу: 6 разів на рік

Дата заснування: грудень 1999 р.

Київ 2018

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 (124)
2018**

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

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

Журнал входить до переліку наукових фахових видань України. Наказ МОН України від 13.07.2015 № 747 (додаток 17, рішення щодо подовження) – фаховість із технічних наук.

ISSN 1813-6796

Журнал зареєстровано в Міжнародному центрі періодичних видань (ISSN International Centre, Париж, Франція) 22.12.2004 р.

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:

Каплун В. В., 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 № 1 від 30.08.2018 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

Technical Science Series

№4 (124), 2018

DOI:10.30857/1813-6796.2018.4

Scientific Specialized Edition

Issued: 6 times a year

Founded: December, 1999

Kyiv 2018

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 (124)
2018** 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:

- № 747, originating date 13.07.2015. Fields: technological.

ISSN 1813-6796 The journal is registered in ISSN International Centre, Paris, originating date is 22.12.2004

The journal is abstracted and indexed by Ulrich's Periodicals Directory, EBSCOhost, WorldCat, ПИИЦ, 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: **Viktor V. Kaplun** - Dr., professor

**Executive
secretary:** **Viktoria M. Vasylenko** - PhD

Scientific fields: 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 № 1, originating date 30.08.2018.

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. | PANASYUK I. V., KUZNETSOVA O. O. Thermal insulation performance of steel framed walls | 9 |
| 2. | БЕРЕЗІН Л. М., РУБАНКА М. М. До розрахунків деталей на міцність в ймовірнісному аспекті | 17 |
| 3. | РУСУ О. П., ГАЙ Д. О., УСТЕНКО А. Ю. Використання сонячних колекторів у системах обігріву приміщень | 26 |
| 4. | КАПЛУН В. В., ШВЕДЧИКОВА І. О., КРАВЧЕНКО О. П., ШЕВЧЕНКО О. О. Комплексна освітня платформа проектної діяльності у сфері енергоефективності | 34 |
| 5. | АЛЕКСІЄВСЬКИЙ Д. Г., МАНАЄВ К. В., ПАНКОВА О. О., ТАРАНЕЦЬ А. В., ШМАЛІЙ С. Л. Візуальна математична модель електромеханічної системи вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням | 45 |
| 6. | ШАВЬОЛКІН О. О. Удосконалення перетворювального агрегату системи електроживлення з фотоелектричною сонячною батареєю | 56 |
| 7. | ШВЕДЧИКОВА І. О., РОМАНЧЕНКО Ю. А. Дослідження силових характеристик поліградієнтного електромагнітного сепаратора при зміні форми пластин матриці | 68 |
| 8. | СЕБКО В. В., ЗДОРЕНКО В. Г. Безконтактний метод трипараметрового вимірювального контролю фізико-хімічних характеристик зразка феромагнітної рідини | 77 |
| 9. | СТАЦЕНКО В. В., БІЛА Т. Я., БУРМІСТЕНКОВ О. П. Аналіз руху сипкого матеріалу на виході бункерів | 85 |
| 10. | ЛОБОДЗИНСЬКИЙ В. Ю., ЧИБЕЛІС В. І. Математична модель трифазної лінії з розподіленими параметрами при електромагнітних перехідних процесах | 96 |
| 11. | КУЛИК В. В., БУРИКІН О. Б., ПРНЯК В. М. Комплексне оцінювання ефективності встановлення додаткових джерел реактивної потужності у розподільних електричних мережах | 103 |

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ІНДУСТРІЇ МОДИ, ТЕХНОЛОГІЙ
ВИРОБНИЦТВА ТЕКСТИЛЮ, ОДЯГУ ТА ВЗУТТЯ

- | | | |
|-----|--|-----|
| 12. | СЛІЗКОВ А. М., МИХАЙЛОВА Г. М., ОСІЄВСЬКА В. В. Розроблення наукової класифікації текстильних виробів для сну з об'ємними наповнювачами на прикладі подушок | 112 |
|-----|--|-----|

UDC 620.91:697.1

PANASYUK I. V., KUZNETSOVA O. O.

Kyiv National University of Technologies and Design

THERMAL INSULATION PERFORMANCE OF STEEL FRAMED WALLS

Purpose. To determine metal stud wall systems with improved thermal insulation performance.

Methodology. Thermal transmittance of steel framed walls was analyzed using heat-transfer simulation program THERM 7.6.

Findings. Thermal insulation performance of various configurations of metal stud walls has been evaluated.

Scientific novelty. Approaches to enhance thermal insulation performance of steel framed walls were determined.

Practical value. The work results can be used in designing new energy efficient building.

Key words: steel framed wall, U-value, thermal insulation, thermal insulation performance.

Introduction. Commercial and residential buildings consume about one-third of world's energy [1]. To enhance energy efficiency and sustainability in the building sector, it is important to reduce the energy consumption of buildings, especially in their operational stage, since this represents 80%–85% [2] of total energy consumed during their life cycle. Therefore, it is fundamental to develop constructive solutions and methods that offer advantages in reducing buildings energy consumption during operational stage of their life cycle.

Over the last few years, alternatives to the traditional constructive methods have been developed. The lightweight steel framing (LSF) system, characterized by using cold-formed steel profiles and pre-fabricated non-structural panels, is an example of this new and growing trend.

The use of LSF system as a structural element in buildings has increased in recent years. Its various advantages [3] include high mechanical strength and lightweight, easy and rapid prefabrication and high potential for recycling and reuse.

However, LSF also presents some drawbacks [4]. Unfortunately, because the metal components in the walls can create significant thermal bridges, such walls, if not suitably designed, could lead to excessive heat transfer through building walls. Given this, in the recent years significant efforts to assess and improve the thermal behavior of constructive solutions with steel structures were undertaken. Kosny and Christian [5] showed that the use of continuous exterior thermal insulation is an effective way to reduce thermal bridges and enhance thermal performance of metal framed walls. Höglund and Burstrandb [6] studied an efficient way to reduce heat flow by reducing the area of the steel profile, with the insertion of slots in the web studs.

Objectives. The task of the work consisted in evaluation and comparison of thermal insulation performance of various types of metal stud walls. For that purpose three common types of metal stud walls were simulated, and three levels of insulation were included in the models for each type of wall. The comparison of thermal insulation performance of the simulated metal framed walls was done. The approaches to enhance the thermal insulation performance of such walls were outlined.

Research results. The wall model to be simulated is represented in Figure 1. The wall comprises a steel structure containing galvanized cold-formed steel studs with a “U” cross-sectional

shape (8.9 cm depth and 4.1 cm flange (8.9x4.1 cm) or 10.2 depth and 4.1 cm flange (10.2x4.1 cm), 1.2 mm thick). The spacing between studs is 400 mm or 600 mm.

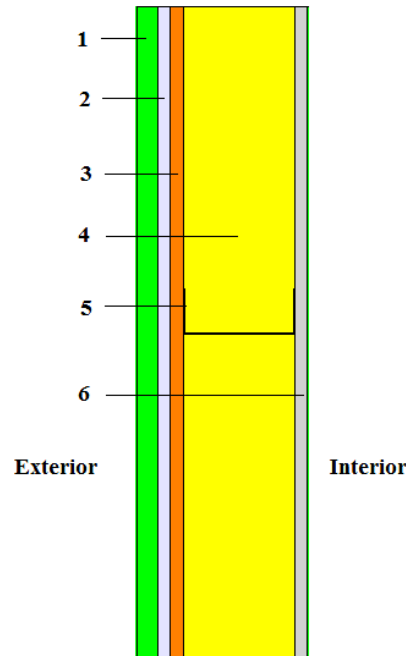


Fig. 1. The scheme of a fragment of the steel framed wall.
Materials: 1- external plaster; 2 - sheathing insulation (optional); 3 - oriented strand board (OSB); 4 - mineral wool; 5 – steel stud; 6 - plasterboard

Three common types of metal stud walls were simulated, and three levels of insulation were included in the models for each type of wall. The total number of simulated walls reached 9. Configurations of these walls are described in Table 1.

The thermal properties of the materials were assumed to be uniform for all simulated walls to aid the evaluation analysis. They are presented in Table 2.

Table 1.

Configuration and characteristics of simulated steel framed walls

Wall symbol	Size of steel studs; studs spacing	Insulation of wall cavity	Exterior/interior surface finish	Optional sheathing insulation between OSB and external plaster
A1	8.9x4.1 cm, 1.2 mm thickness, spacing 40 cm o.c.	Mineral wool	Interior – 1.25 cm plasterboard; exterior – 2 cm external plaster; sheathing insulation - optional	no
A2				1.2 cm of expanded polystyrene
A3				2.5 cm of expanded polystyrene
B1	8.9x4.1 cm, 1.2 mm thickness, spacing 60 cm o.c.	Mineral wool	Interior – 1.25 cm plasterboard; exterior – 2 cm external plaster; sheathing insulation - optional	no
B2				1.2 cm of expanded polystyrene
B3				2.5 cm of expanded polystyrene

Table 1.

C1	10.2x4.1 cm, 1.2 mm thickness, spacing 60 cm o.c.	Mineral wool	Interior – 1.25 cm plasterboard; exterior – 2 cm external plaster; sheathing insulation – optional	no
C2				1.2 cm of expanded polystyrene
C3				2.5 cm of expanded polystyrene

Table 2

Thermal properties of wall materials

№	Wall material	Thermal conductivity, λ , W/(m·K)
1	Plasterboard	0,21
2	Mineral wool	0,04
3	Oriented strand board	0,13
4	Expanded polystyrene	0,038
5	Steel	50

The following boundary conditions were set for external and internal environment: an external temperature equal to 0 °C and a convective surface heat transfer coefficient $h_e=25$ W/(m²·K); the internal temperature was defined at 20 °C and a convective surface heat transfer coefficient $h_i=7.69$ W/(m²·K). These convective surface heat transfer coefficients were established according to EN ISO 6946 [7] for a horizontal heat flow.

In order to calculate the U-value of the LSF facade walls, first it is necessary to identify a representative wall section to model. For a wall with a single layer of vertical steel studs and a frequency of 600 mm (or 400 mm) every two studs, standard ISO EN 10211 [8] suggest taking advantage of its symmetry to position the adiabatic plans (zero heat flow). Therefore, a cross-section of the wall measuring 600 mm (or 400 mm), with a steel stud in the core, was considered as a geometric model.

Thermal insulation performance of steel framed walls was analyzed with heat-transfer simulation program THERM 7.6 [9].

THERM is a state-of-the-art computer program developed at Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) for use by building component manufacturers, engineers, educators, students, architects, and others interested in heat transfer.

THERM's two-dimensional conduction heat-transfer analysis is based on the finite-element method, which can model the complicated geometries of building products.

Temperature distribution maps obtained during computer modeling are represented in Figure 2.

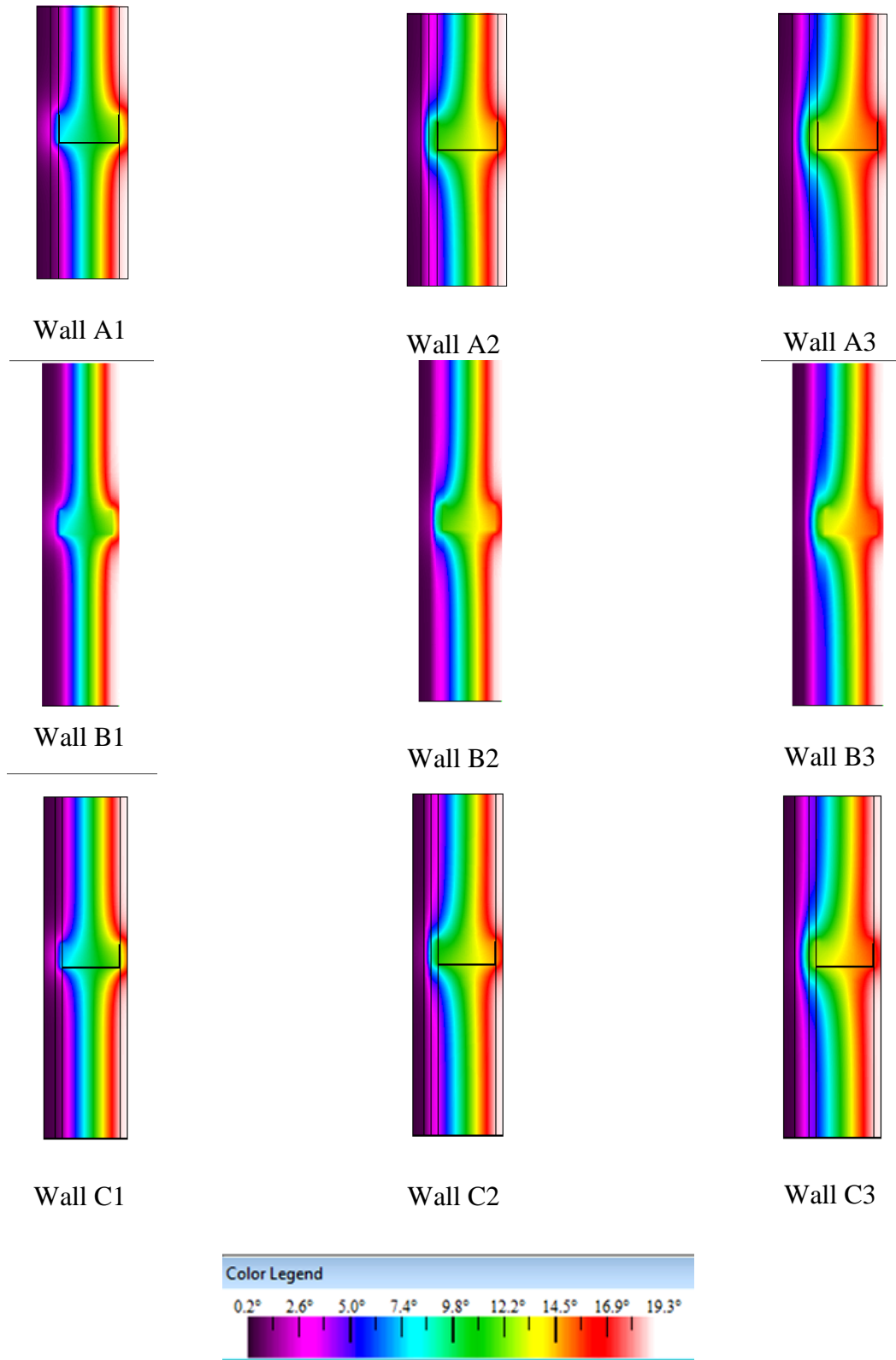


Fig. 2. Temperature profiles

These temperature maps were used to estimate average surface heat flux for all considered walls. A knowledge of heat flux values allowed U-value calculations. Table 3 represents all U-values calculated as a result of THERM 7.6 modeling. For three types of walls, three levels of exterior insulation were considered. In these cases (walls A, B, and C, without exterior EPS sheathing), U-values between 0.55 and 0.69 W/ m²·K were obtained as a result of computer modeling. It can be observed from these models that 2.5 cm of EPS layer may lower U-value of the metal stud wall from 32 to 36 %.

Table 3

U-values of metal stud framed walls simulated

Wall symbol	U-value, W/(m ² ·K)
A1	0,69
A2	0,53
A3	0,44
B1	0,59
B2	0,47
B3	0,39
C1	0,55
C2	0,43
C3	0,37

Changing stud spacing from 40 in. to 60 cm o.c. (walls A and B) decreased wall U-value. The highest improvement was observed at 15% for a wall without exterior EPS sheathing. The efficiency of this change decreases for the walls with additional exterior insulation. The decrease in U-value caused by the increased spacing was about 11% for walls with 1.2 cm of EPS and about 9.5% with 2.5 cm of EPS.

It can also be observed that additional layers of EPS sheathing of the same thickness may result in different decreases in wall U-values for various wall configurations.

Calculations for metal frame walls show that the simulated wall U-value can be considerably higher than the "ideal" U-value calculated, excluding the effects of thermal bridges caused by metal studs. However, those comparisons do not clearly show how effectively the wall materials are used. The data in Table 4 depict a comparison between U-values simulated by THERM 7.6 and "ideal" U-values calculated only for layers of the used materials (excluding the metal studs). The increase of wall U-value due to the metal studs is called the *framing effect*, (*f*). It can be described by the following formula:

$$f = \left(1 - \frac{U_{ideal}}{U_{simulated}}\right) \cdot 100\%$$

where $U_{simulated}$ - simulated U-value and U_{ideal} – “ideal” U-value calculated only for layers of the used materials (excluding the metal studs).

Table 4

The magnitude of framing effect f

Wall symbol	Framing effect, %
A1	44,2
A2	35,2
A3	30,0
B1	34,8
B2	26,9
B3	22,6
C1	37,9
C2	29,3
C3	25,1

For the wall with 8.9 cm metal studs, 1.2 mm thick, installed with 40 cm o.c., without sheathing insulation the increase in U-value compared with “ideal” U-value (excluding the metal studs) reaches 44.2 %. The framing effect is lowered with the increase in sheathing insulation thickness as well as spacing between studs. For wall B3 the framing effect is only 22.6 %. However, comparing walls B and C, it can be seen, that walls C have higher values of framing effect than walls B with the same amount of sheathing insulation. This phenomenon can be explained by higher depth (10.2 cm versus 8.9 cm) of metal studs installed in walls C.

Conclusions. In this study, thermal properties of 9 metal framed walls with various configurations of insulation and various metal stud sizes and spacing were examined analytically. The results obtained led to the following conclusions.

- Installing additional exterior sheathing insulation is an effective way to improve the thermal insulation performance of the metal framed walls.
- Changing stud spacing from 40 cm o.c. to 60 cm o.c. decreased wall U-value by nearly 15 % for a wall without exterior EPS sheathing. The efficiency of this change decreases for walls with additional exterior insulation sheathing. The decrease in U-value caused by the increased spacing was about 11 % with 1.2 cm of EPS and about 9.5 % with 2.5 cm of EPS.
- Changing the distance between metal studs from 40 to 60 cm o.c. reduced the value of the framing effect (caused by metal studs) by about 9.4 %. However, the framing effect can also be lowered by the addition of EPS sheathing - about 14 % for walls with 2.5 cm thick layer of EPS.

Література

1. Kuznetsova, E. A (2016). A review of definitions of zero energy buildings. *Metallurgical and Mining Industry, 11*, 92 – 98.
2. Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., & Shree, V. (2011). Life cycle assessment of buildings: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(1)*, 871-875.
3. Murtinho, V., Ferreira, H., Correia, A., et al. (2010). Affordable houses: architectural concept of light steel residential house. In: ICSA2010 –

References

1. Kuznetsova, E. A (2016). A review of definitions of zero energy buildings. *Metallurgical and Mining Industry, 11*, 92 – 98.
2. Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., & Shree, V. (2011). Life cycle assessment of buildings: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(1)*, 871-875.
3. Murtinho, V., Ferreira, H., Correia, A., et al. (2010). Affordable houses: architectural concept of light steel residential house. In: ICSA2010 –

International conference on structures and architecture, 1291–1297.

4. Santos, P., da Silva, L. S., & Ungureanu, V. *Energy Efficiency of Light-weight Steel-framed Buildings, European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Technical Committee 14–Sustainability and Eco-Efficiency of Steel Construction, N.129,2012.* ISBN 978-92-9147-105-8.

5. Kosny, J. & Christian, JE. (1995). Thermal evaluation of several configurations of insulation and structural materials for some metal stud walls. *Energy and Buildings* 22(2), 157–163.

6. Höglund, T. & Burstrandb, H. (1998). Slotted steel studs to reduce thermal bridges in insulated walls. *Thin-Walled Structures*, 32, 81–109.

7. EN ISO 6946:2008. Building Components and Elements—Thermal Resistance and Thermal Transmittance – Calculation Method; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2008.

8. EN ISO 10211. Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – detailed calculations (ISO 10211:2007), CEN, 2007.

9. THERM. Retrieved from: <https://windows.lbl.gov/software/therm>

International conference on structures and architecture, 1291–1297.

4. Santos, P., da Silva, L. S., & Ungureanu, V. *Energy Efficiency of Light-weight Steel-framed Buildings, European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Technical Committee 14–Sustainability and Eco-Efficiency of Steel Construction, N.129,2012.* ISBN 978-92-9147-105-8.

5. Kosny, J. & Christian, JE. (1995). Thermal evaluation of several configurations of insulation and structural materials for some metal stud walls. *Energy and Buildings* 22(2), 157–163.

6. Höglund, T. & Burstrandb, H. (1998). Slotted steel studs to reduce thermal bridges in insulated walls. *Thin-Walled Structures*, 32, 81–109.

7. EN ISO 6946:2008. Building Components and Elements—Thermal Resistance and Thermal Transmittance – Calculation Method; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2008.

8. EN ISO 10211. Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – detailed calculations (ISO 10211:2007), CEN, 2007.

9. THERM. Retrieved from: <https://windows.lbl.gov/software/therm>

PANASIUK IGOR

panasjuk.i@knutd.edu.ua

ORCID: 0000-0001-6671-4266

Researcher ID: 56672850100

*Head of Department of heat and power engineering,
resource saving and technological safety
Kiev National University of Technologies & Design*

KUZNETSOVA OLENA

ekyznec@ukr.net

ORCID: 0000-0002-1786-314X

Researcher ID: 57143768700

*Heat-and-Power Engineering, Resource Saving and
Technogenic Safety Department
Kiev National University of Technologies & Design*

ТЕПЛОЗАХИСНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СТІН ІЗ МЕТАЛЕВИМ КАРКАСОМ

ПАНАСЮК І. В., КУЗНЕЦОВА О. О.

Київський національний університет технологій та дизайну

Мета. *Визначити конфігурації металокаркасних стін із підвищеною теплозахисною ефективністю.*

Методика. *Приведені коефіцієнти теплопередачі стін зі сталевими каркасами були визначені за допомогою прикладної комп'ютерної програми для моделювання теплопередачі THERM 7.6.*

Результати. *Було оцінено теплозахисні характеристики різноманітних конфігурацій стін із металевим каркасом.*

Наукова новизна. Визначено шляхи підвищення теплозахисної ефективності металокаркасних стін.

Практична значимість. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні нових енергоефективних будівель та споруд.

Ключові слова: стіна із металевим каркасом, коефіцієнт теплопередачі, тепла ізоляція, теплозахисна ефективність.

ТЕПЛОЗАЩИТНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТЕН С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ КАРКАСОМ ПАНАСЮК И. В., КУЗНЕЦОВА Е. А.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Определить конфигурации металлокаркасных стен с улучшенными теплозащитными характеристиками.

Методика. Коэффициенты теплопередачи металлокаркасных стен были определены с помощью прикладной компьютерной программы для моделирования теплопередачи THERM 7.6.

Результаты. Были оценены теплозащитные характеристики различных конфигураций стен с металлическим каркасом.

Научная новизна. Определены подходы для повышения теплозащитной эффективности металлокаркасных стен.

Практическая ценность. Результаты работы могут быть использованы при проектировании новых энергоэффективных зданий и сооружений.

Ключевые слова: стена с металлическим каркасом, коэффициент теплопередачи, теплоизоляция, теплозащитная эффективность.

УДК 621.82:539.43

БЕРЕЗІН Л. М., РУБАНКА М. М.

Київський національний університет технологій та дизайну

ДО РОЗРАХУНКІВ ДЕТАЛЕЙ НА МІЦНІСТЬ В ЙМОВІРНІСНОМУ АСПЕКТІ

Мета. Узагальнення нормативних положень та довідкової емпіричної та аналітичної інформації щодо обчислення статистичних характеристик міцності металів та деталей, які використовують в розрахунках на міцність в ймовірнісному аспекті.

Методика. Використовуються сучасні методи пошуку, опису та аналізу інформації для аудиту множини можливих рішень в предметній області досліджень, напрацювання з опору матеріалів, математичної статистики та теорії ймовірностей.

Результати. Розглядається можливість застосування на етапі проектування розрахунків статистичних характеристик опору втомленості деталей при обмеженні даних по механічним характеристикам міцності матеріалу. Результати досліджень дозволяють приймати обґрунтовані заходи по підвищенню границь втомленості деталей.

Наукова новизна. Полягає в подальшому розвитку теорії і методології математичного забезпечення для проектування деталей машин з заданими характеристиками надійності за втомленісною міцністю при мінімізації їх ваги та розмірів.

Практична значимість. Представлена інформація підвищує якість та ефективність проектних рішень по забезпеченню заданої надійності деталей на прикладі циліндричної гвинтової пружини в широкому діапазоні зміни її геометричних, пружних та силових параметрів.

Ключові слова: проектування, розрахунок, циліндрична гвинтова пружина, опір втомленості, статистичні характеристики міцності.

Вступ. На основі аналізу існуючого парку обладнання галузі та машин загального призначення встановлена доцільність використання в їх приводах пристроїв для зниження динамічних навантажень [1]. Зроблено висновок про ефективність застосування відцентрових муфт або муфт з пружними елементами. Зокрема пружні запобіжні муфти з циліндричними гвинтовими пружинами (ЦГП) рекомендовано в приводах роторних ножових дробарок [2], в'язальних машин і автоматів [3] та інших. Запропоновано конструкцію пружної запобіжної муфти [4], яка здатна суттєво підвищити експлуатаційну надійність та технологічність обладнання за рахунок зміни жорсткості муфти в залежності від режиму навантаження. Представлено метод вибору раціональних параметрів нової конструкції пружної запобіжної муфти привода, проте відсутня проробка конструкції на втомленісну міцність та надійність.

Постановка завдання. Існує стандарт [5], який регламентує випробування на циклічну довговічність ЦГП стиску та розтягу із сталі круглого перерізу. Але враховуючи значну тривалість випробувань на втомленість пружин (число циклів навантажень до їх злому $N > 10^6$), раціональним вважається застосування аналітичних підходів при оцінці надійності, особливо деталей обладнання малих партій. В розрахунках на міцність в ймовірнісній постановці випадковими величинами є спектр навантажень, що діють на деталь, та механічні характеристики її міцності. Особливо проблемним вважається отримання статистичних параметрів (математичного сподівання, середньо квадратичного відхилення або коефіцієнта варіації) опору втомленості деталей, які переважно відсутні або мають суперечливий характер.

Метою роботи є узагальнення нормативних положень та довідкової емпіричної та аналітичної інформації щодо обчислення статистичних характеристик міцності металів та деталей, які використовують в розрахунках на міцність в ймовірнісному аспекті на прикладі ЦПП запобіжних муфт.

Результати дослідження. У відповідності до результатів попереднього розрахунку [6] розглядається ЦПП класу I (безвідмовний наробіток не менше 10^7 циклів навантаження), розряду 1, за видом – одножилна, розтягу та стиску, з силою пружини при максимальній деформації в межах 22...800 Н, позиції 366 з наступними параметрами: діаметр дроту (прутка) $d=2$ мм; зовнішній діаметр пружини $D=14$ мм; матеріал прутка – легована, ресорно-пружина сталь 50ХФА, яка відповідає вимогам високої втомленісної міцності. Визначаються статистичні характеристики міцності сталі 50ХФА та пружини, які в подальшому використовуються в перевірних розрахунках на міцність по дотичним напруженням в ймовірнісному аспекті.

Вибрано калібрований пруток сортового прокату Дрiт 50ХФА-К-1А-П-Д-2 ГОСТ1071-81. За станом поставки [7] механічні характеристики сталі 50ХФА мають наступні значення: границя міцності $\sigma_B=1270$ МПа, границя текучості $\sigma_T=1080$ МПа, а характеристики втомленості за нормальними σ_{-1} та дотичними τ_{-1} напруженнями в залежності від термообробки змінюються в значних межах. Суперечливі відомості про характеристики втомленості сталі 50ХФА надано в [8-9].

При відсутності достовірних експериментальних даних про математичне сподівання границі втомленості матеріалу при крученні, величину $\bar{\tau}_{-1}$ рекомендується [10] визначати опосередковано за $\bar{\sigma}_{-1}$. Оскільки найбільш точний зв'язок існує між величинами $\bar{\sigma}_{-1}$ та σ_B , попередньо використовуємо емпіричну формулу виду:

$$\sigma_{-1} = (0,55 - 0,0001\sigma_B) \sigma_B \quad (1)$$

При $\sigma_B=1270$ МПа за формулою (1) маємо $\sigma_{-1}=537$ МПа. Далі за залежністю $\tau_{-1} = 0,6\sigma_{-1}$ визначаємо шукану величину – границю втомленості матеріалу по дотичним напруженням при симетричному режимі навантаження: $\tau_{-1} = 322$ МПа. При відсутності інформації про σ_B можна користуватися величиною σ_T та залежністю $\sigma_B = \sigma_T / 0,88$.

В розрахунках на втомленісну міцність ЦПП використовуємо типову методику переходу за характеристиками втомленості від матеріалу $\bar{\tau}_{-1}$ до деталі $\bar{\tau}_{-1Д}$ [11]:

$$\bar{\tau}_{-1Д} = \frac{\bar{\tau}_{-1}}{K} \quad (2)$$

де K - коефіцієнт, що враховує фактори, які впливають на опір втомленості деталі при крученні.

Багатофакторність впливу на коефіцієнт K враховується в наступній формулі:

$$K = \left(\frac{k_{\tau}}{k_{d\tau}} + \frac{1}{k_{F\tau}} - 1 \right) \frac{1}{k_v \cdot k_A} \quad (3)$$

де k_{τ} - коефіцієнт концентрації дотичних напружень пружини при деформації кручення;

$k_{d\tau}$ - масштабний фактор, який враховує вплив абсолютних розмірів поперечного перерізу дроту пружини;

$k_{F\tau}$ - коефіцієнт, який враховує вплив стану поверхні та глибини шару видалення водню на опір втомленості;

k_v - коефіцієнт, який враховує технологічні методи поверхневого зміцнення деталі;

k_A - коефіцієнт анізотропії.

Явище концентрації напружень виникає через зміну форми деталі, що впливає на кривизну силових ліній. Коефіцієнти концентрації звичайно встановлюють експериментальним шляхом за відношенням $k_{\tau} = \tau_{-1} / \tau_{-1Д}$ границь втомленості відповідно гладких зразків τ_{-1} та зразків з концентрацією напружень $\tau_{-1Д}$. При їх відсутності в наближених розрахунках використовують наступну формулу [10]:

$$k_{\tau} = 1 + q(\alpha_{\tau} - 1) \quad (4)$$

де q - коефіцієнт чутливості металу до концентрації напружень (для вуглецевих сталей $q=0,6...0,8$; для легованих $q=0,7...0,9$; для високоміцних $q \approx 1$; для чавуну $q \approx 0$);

α_{τ} - теоретичний коефіцієнт концентрації напружень, який залежить від форми концентратора (в [11] наводяться розрахункові формули визначення α_{τ} для найбільш поширених видів концентраторів).

Звичайно для циліндричного прутка пружини, як і гладкого валу, рекомендується [12] приймати $\alpha_{\tau}=1$, тобто за формулою (4) маємо $k_{\tau}=1$.

В [12] пропонуються інші залежності для обрахунку значень коефіцієнту чутливості металу до концентрації стосовно нормальних напружень:

$$q_{\sigma} = 0,211 - 0,000143\sigma_B \quad \text{при } \sigma_B \leq 1300 \text{ МПа,}$$
$$q_{\sigma} = 0,025 \quad \text{при } \sigma_B > 1300 \text{ МПа.}$$

При крученні наближено приймають $q_T = 1,5q_{\sigma}$.

Через вплив великої кількості факторів на коефіцієнт q , останнім часом використовується сучасна методика розрахунку коефіцієнта k_{τ} [11]:

$$k_{\tau} = \frac{\alpha_{\tau}}{n} \quad (5)$$

де $n = 1 + \sqrt{G_\tau} \cdot 10^{-(0,33 + \frac{\sigma_T}{712})}$;

\bar{G}_τ - відносний градієнт (перепад) дотичних напружень при крученні в мм^{-1} , який визначається експериментально або обчислюється за формулами в [11] (наприклад, для прутка, як деталі циліндричної форми без концентрації напружень на поверхні $\bar{G}_\tau = 2/d = 1 \text{ мм}^{-1}$).

В результаті розрахунків за формулою (5) при $n=0,017$ та $\alpha_\tau=1,0$ маємо $k_\tau=0,983$, що підтверджує наближення до 1.

Коефіцієнт $k_{d\tau}$ для легованих сталей рекомендується [11] визначати за формулою:

$$k_{d\tau} = 1 - 0,2 \lg \frac{d}{d_o} \text{ при } d \leq 150 \text{ мм} \quad \text{або} \quad k_{d\tau} = 1 \text{ при } d > 150 \text{ мм} \quad (6)$$

де $d_o = 7,5 \text{ мм}$ – діаметр гладкого лабораторного зразку.

Також пропонується емпірична залежність виду [13]:

$$k_{d\tau} = \frac{1}{0,8127 + 0,0676d - 0,0042d^2} \quad (7)$$

де діаметр d задається в см.

Після обрахунку за формулою (7) при $d=0,2 \text{ см}$ маємо $k_{d\tau}=1,21$.

В табл.1 [5] наведено залежність $k_{d\tau}(d)$ з обмеженням за найменшим значенням $d=11 \text{ мм}$. Виконуючи інтерполявання для $d=2 \text{ мм}$, отримуємо $k_{d\tau}=1,209$, що підтверджує правильність попереднього розрахунку.

Для опису впливу геометричних факторів (канавок, галтелей, отворів тощо) на концентрацію напружень та масштабний фактор за комплексним коефіцієнтом $k_\tau / k_{d\tau}$ рекомендовано застосовувати статистичну теорію подібності втомленісного руйнування [10-12]. Цей підхід використовують переважно для деталей складних форм, для яких окреме обчислення k_τ та $k_{d\tau}$ за формулами (4-7) може призвести до значних похибок.

Нерівності на поверхні суттєво знижують опір втомленості деталей, зокрема із легованих сталей. На поверхні дроту пружин допускається окисна плівка та окремі волочильні риски, глибина яких регламентується в [14]. Кількісно вплив якості поверхні на границі втомленості визначається за формулами:

$$k_{F\sigma} = 1 - 0,22 \lg R_Z \left(\lg \frac{\sigma_B}{20} - 1 \right) \text{ при } R_Z > 1 \text{ мкм}; \quad k_{F\sigma} = 1 \text{ при } R_Z \leq 1 \text{ мкм} \quad (8)$$

$$k_{F\tau} = 0,575 \cdot k_{F\sigma} + 0,425 \quad (9)$$

де R_Z - шорсткість поверхні прутка.

За [14] поставки дроту групи А мають 9 клас шорсткості ($R_Z = 2,6...0,8\text{мкм}$). При підстановці $R_Z \leq 2,6\text{мкм}$ за формулами (8) та (9) маємо $k_{F\sigma} = 0,927$ та $k_{F\tau} = 0,958$.

Коефіцієнт k_v , який враховує методи поверхневого зміцнення деталей, дорівнює відношенню границі втомленості деталі з поверхневим зміцненням $\sigma_{-1D_{зм}}$ до границі втомленості деталі без зміцнення σ_{-1D} . В розрахунках пружин за рекомендацією [5] k_v надають наступні значення: 1,0 – при відсутності зміцнення; 1,15 – при застосуванні зміцнення наклепом. Детальна інформація стосовно k_v для інших видів обробки в залежності від діаметру зразку та наявності концентра напружень приведена в [10]. Очевидно, що з ростом рівня концентрації напружень ефект зміцнення зростає, при збільшенні розмірів деталі – зменшується. У відповідності до технології виготовлення прутка пружин приймаємо $k_v = 1,15$.

Коефіцієнтом анізотропії k_A в розрахунках ЦГП через незначний діаметр дроту нехтуємо.

Після підстановки обчислених значень коефіцієнтів k_τ , $k_{F\tau}$, $k_{d\tau}$, k_v , k_A в формулу (3) маємо $K = 0,757$. Звичайно в розрахунках $K = 1,5...3$. Розбіжність передусім пояснюється тим, що діаметр дроту d значно менший за діаметр d_o лабораторного зразку, для якого визначають границі міцності, та розмірів більшості реальних деталей. Зменшенню K також сприяє технологія зміцнення дроту пружини.

Далі за формулою (2) маємо $\bar{\tau}_{-1D} = 425\text{МПа}$.

В ймовірнісних розрахунках на міцність розсіяння значень границі втомленості деталі виражають середньо квадратичним відхилення або коефіцієнтом варіації. Дослідження границь втомленості деталей свідчить про значне їх розсіяння, яке вивчено недостатньо, що пояснюється необхідністю збільшення числа дослідів та відсутністю в існуючих розрахунках вимог диференціального обліку розсіяння.

При відсутності даних загальний коефіцієнт варіації границі втомленості деталі допускається розраховувати за формулою [10]:

$$v_{\tau_{-1D}} = \sqrt{v_{\tau_{max}}^2 + v_{\tau_{-1}}^2 + v_{\alpha_\tau}^2} \quad (10)$$

де $v_{\tau_{max}}$ - коефіцієнт варіації максимальних руйнуючих напружень в зоні концентрації;

$v_{\tau_{-1}}$ - коефіцієнт варіації середніх (в межах однієї плавки) значень границь втомленості зразків;

v_{α_τ} - коефіцієнт варіації теоретичного коефіцієнту концентрації напружень α_τ , який враховує відхилення фактичних розмірів деталей (в границях допусків).

За рекомендаціями [11] в першому наближенні допустимо приймати $v_{\tau_{max}} = 0,06...0,1$.

Вибираємо $v_{\tau_{max}} = 0,08$. Враховуючи практично лінійну залежність між границями втомленості та границями міцності матеріалу [12], допускають, що $v_{\tau_{-1}} = v_{\tau_B}$, де v_{τ_B} –

коефіцієнт варіації границі міцності металу при крученні за множиною всіх плавок. Для покращених або нормалізованих сталей значення ν_{τ_B} знаходиться в межах 0,03...0,04, для сталей з термічно зміцненою поверхнею – 0,05...0,07, для легованих – 0,04...0,10. В розрахунках приймаємо $\nu_{\tau-1} = 0,07$.

Геометрична точність дроту пружин також впливає на розсіяння значень границі втомленості. У відповідності до [15] пружини категорії А виготовляються із спеціальною обробкою поверхні дроту, мають параметри шорсткості та допустимі дефекти поверхні не менші групи обробки Г, за граничними відхиленнями діаметру від номінального розміру – не більше квалітету 11 (для $d \leq 3$ мм відхилення становить 60 мкм). Оскільки допуск на діаметр при прийнятій технології незначний, то приймаємо, що $\nu_{\alpha_\tau} = 0$.

Остаточно за формулою (10) маємо $\nu_{\tau-1D} = 0,106$.

Обчислені параметри $\bar{\tau}_{-1D} = 425$ МПа та $\nu_{\tau-1D} = 0,106$ надалі використовуються в розрахунках ЦГП на втомленісну міцність в ймовірнісній постановці.

Висновки. Показана можливість застосування на етапі проектування розрахунків статистичних характеристик опору втомленості деталі при обмеженні даних за механічними характеристиками міцності матеріалу. Представлена інформація підвищує якість та ефективність проектних рішень по забезпеченню заданої надійності деталей на прикладі ЦГП в широкому діапазоні зміни її геометричних, пружних та силових параметрів.

Результати досліджень дозволяють приймати обґрунтовані заходи щодо збільшення величини границі втомленості прутка із сталі 50ХФА ЦГП, а саме:

- запобігання обезводненню поверхні пружини при виготовленні та термообробці;
- зміцнення пружини одним із способів: наклепом дробом або заневолуванням;
- заміна однієї пружини декількома пружинами при зберіганні сумарної жорсткості пружин;
- використання марок сталі з кращими характеристиками міцності.

Література

1. Музичишин С. В. Класифікація пристроїв зниження динамічних навантажень механічних систем / С. В. Музичишин, Б. Ф. Піпа // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2014. – № 6. – С. 6–12.
2. Рубанка М. М. Доцільність використання в приводі роторної ножової дробарки пружної запобіжної муфти / М. М. Рубанка, Б. Ф. Піпа, Ю. А. Ковальов // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2014. – № 2 (76). – С. 97–102.

References

1. Muzichishin, S. V., Pipa, B. F. (2014). Klyasyfikatsiia prystroiv znazhennia dynamichnykh navantazhen mekhanichnykh system [Classification of devices for estimating dynamic loads of mechanical systems] *Visnyk kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – Bulletin of Kiev National University of Technologies & Design, Vol. 6, 6–12* [in Ukrainian].
2. Rubanka, N. N., Pipa, B. F., Misiats, V. P. (2014). Dotsilnist vykorystannia v pryvodi rotornoi nozhovoi drobarky pruzhnoi zapobizhnoi mufty [Expediency of the usage of the resilient preventive muff in drive rotor knife crusher] *Visnyk kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – Bulletin of Kiev National University of Technologies & Design, Vol. 2, 97–102* [in Ukrainian].
3. Pipa, B. F., Muzichishin, S. V. (2015). Vybir parametriv

3. Піпа Б. Ф. Вибір параметрів пристрою зниження динамічних навантажень в приводі в'язальних машин з муфтою з пакетами гільзових пружин // Б. Ф. Піпа, С. В. Музичисин // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2015. – № 1 (82). – С. 13–18.

4. Місяць В. П., Рубанка М. М., Піпа Б. Ф., винахідники. Муфта. Український патент, № u201403451, 2014.

5. ДСТУ 32208-2016. Пружини ресорного підвішування залізничного рухомого складу. Метод випробування на циклічну довговічність. Україна. Дата введення 2016-10-01.

6. ДСТУ ГОСТ 13767-2008. Пружини винтові циліндричні сжатия і растяжения I класу, розряду 2 із сталі круглого сечення. Основні параметри витків. Україна. Дата введення 2008-07-01.

7. ДСТУ 8429-2015. Прокат із ресорно-пружинної вуглецевої та легованої сталі. Технічні умови. Україна. Дата введення 2017-07-01.

8. Рахштадт А. Г. Пружинні сталі і сплави / А. Г. Рахштадт. – М.: Металлургия, 1982. – 400 с.

9. Кузьмін Ю. А. Конструювання і розрахунок автомобіля / Ю. А. Кузьмін. – Ульяновск: УЛГТУ, 2008. – 29 с.

10. Когаєв В. П. Розрахунок деталей машин і конструкцій на міцність і довговічність / В. П. Когаєв, Н. А. Махутов, А. П. Гусєнков. – М.: Машиностроєння, 1985. – 224 с.

11. ГОСТ 25.504-82. Розрахунок і випробування на міцність. Методи розрахунок характеристик опору втоми. Москва. Дата введення 1983-30.06.

12. Коновалов Л. В. Напруженість, втоми, надійність деталей металургічних машин / Л. В. Коновалов. – М.: Металлургия, 1981. – 280 с.

13. ДСТУ 4045-2001. Візки вагонів пасажирських магістральних локомотивної тяги. Загальні технічні умови. Україна. Дата введення 2016-11-01.

14. ГОСТ 14963-78 Проволока сталевая

prystroiu znyzhennia dynamichnykh navantazhen v pryvodi v'iazalnykh mashyn z muftoiu z paketamy hilzovykh pruzhyn [Selection of parameters of the device for reducing the dynamic loads in the drive knitting machines with a clutch with packages of sleeve springs] *Visnyk kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – Bulletin of Kiev National University of Technologies & Design, Vol. 1, 13–18* [in Ukrainian].

4. Misiats V. P., Rubanka M. M., Pipa B. F., inventors (2014). Mufta [Muff]. Ukrainian patent, no. u201403451.

5. DSTU 32208-2016. Pruzhyny resornoho pidvishuvannia zaliznychnoho rukhomoho skladu. Metod vyprobuvannia na tsyklichnu dovhovichnist. [State Standard 32208-2016. Springs of spring suspension of the railway rolling stock. Method of fatigue life test]. Ukraine, Standartinform Publ., 2016. 16 p.

6. DSTU GOST 13767-2008. Pruzhyny vyntovyie tsylindrycheskye szhatyia y rastyazhenyia I klassa, razriada 2 yz staly kruhloho sechenyia. Osnovnyie parametry vytkov. [State Standard 13767-2008. Cylindrical helical compression (tension) springs of 1 class and 2 category made of round steel. Main parameters of coils]. Ukraine, Standartinform Publ., 2008. 16 p.

7. DSTU 8429-2015. Prokat yz resorno-pruzhynnoi uhlerodystoi y lehyrovannoi staly. Tekhnycheskye uslovyia [State Standard 8429-2015. Spring carbon and alloy steel bars. Specifications]. Ukraine, Standartinform Publ., 2015. 19 p.

8. Rakhshadt, A. G. (1982). *Pruzhylnnye staly y сплавы* [Spring steel and alloys]. Moscow: Metallurgy [in Russian].

9. Kuzmin, U. A. (2008). *Konstruyrovanye y raschet avtomobylya* [Designing and calculating a car]. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University [in Russian].

10. Kohaev, V. P., Makhutov, N. A. & Husenkov, A. P. (1985). *Raschety detalei mashyn y konstruktsyi na prochnost y dolhovечnost* [The calculations the details and structures of machines on strength and longevity]. Moscow: Mashynostroenyie [in Russian].

11. GOST 25.504-82. Raschety y uspytanyia na prochnost. Metody rascheta kharakterystyk soprotivlenyia ustalosty. [State Standard 25.504-82. Strength calculation and testing. Methods of fatigue strength behavior calculation]. Moscow, Standartinform Publ., 1982. 29 p.

12. Konovalov, L.V. (1981). *Nahruzhennost, ustalost, nadezhnost detalei metallurhycheskykh mashyn* [Loudness, fatigue, reliability of metallurgical machinery details]. Moscow: Metallurgy [in Russian].

13. DSTU 4045-2001. Vahony passazhyrskyie lokomotyvnoi tiahы. Obschche tekhnnycheskyie trebovaniya. [State Standard 55182-2012. Passenger cars on locomotive traction. General technical requirements]. Ukraine, Standartinform Publ., 2016. 24 p.

14. GOST 14963-78. Provoloka stalnaia lehyrovannaia pruzhynnaia. Tekhnycheskyie uslovyia. [State Standard

легированная пружинная. Технические условия. Москва. Дата введения 1980-01.01.

15. ДСТУ 1452-2007 Пружини циліндричні гвинтові візків та ударно-тягових приладів рухомого складу залізниць. Технічні умови. Україна. Дата введення 2007-10-01.

14963-78. Alloyed steel spring wire. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1980. 43 p.

15. DSTU 1452-2007 Pruzhyny tsylyndrycheskye vyntovyie telezhek y udarno-tiahovyykh pryborov podvyzhnoho sostava zheleznykh doroh. Tekhnicheskye uslovyia. [State Standard 1452-2007. Screw cylindrical springs for trucks and draw-and-buffer gears of railway rolling stock. Specifications]. Ukraine, Standartinform Publ., 2007. 11 p.

BEREZIN LEONID

lnb07@ukr.net

ORCID: orcid.org/0000-0002-2672-6323

*Department of applied mechanics and machines
Kiev National University of Technologies & Design*

RUBANKA MYKOLA

nikolayrubanka@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2367-0333>

*Department of applied mechanics and machines
Kiev National University of Technologies & Design*

К РАСЧЕТУ ДЕТАЛЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ В ВЕРОЯТНОСТНОМ АСПЕКТЕ БЕРЕЗИН Л. Н., РУБАНКА Н. Н.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. *Обобщение нормативных положений, справочной эмпирической и аналитической информации касательно определения статистических характеристик прочности металлов и деталей, которые используют в расчетах на прочность в вероятностном аспекте.*

Методика. *Используются современные методы поиска, описания и анализа информации для аудита множества возможных решений в предметной области исследований, наработок с сопротивления материалов, математической статистики и теории вероятностей.*

Результаты. *Рассматривают возможность использования на этапе проектирования расчетов для определения статистических характеристик сопротивления усталости деталей при ограниченных данных о механических характеристиках прочности материала. Результаты исследований позволяют принимать обоснованные предложения по повышению границ усталости деталей.*

Научная новизна. *Заключается в дальнейшем развитии теории и методологии математического обеспечения для проектирования деталей машин с заданными характеристиками надежности по критерию усталостной прочности при минимизации их веса и размеров.*

Практическая значимость. *Представлена информация, которая повышает качество и эффективность проектных решений по обеспечению заданной надежности деталей. Расчет выполнен на примере цилиндрических винтовых пружин с учетом широкого диапазона изменений их геометрических, упругих и силовых параметров.*

Ключевые слова: *проектирование, расчет, цилиндрическая винтовая пружина, сопротивление усталости, статистические характеристики прочности.*

TO CALCULATE DETAILS FOR STRENGTH IN THE PROBABILITY ASPECT

BEREZIN L. N., RUBANKA N. N.

Kiev National University of Technologies & Design

Purpose. *Generalization of regulations, empirical and analytical information concerning the determination of the statistical characteristics of the strength of metals and details for used in strength calculations in the probabilistic aspect.*

Methodology. *Are used modern methods of searching, describing and analyzing information to audit a variety of possible solutions in the subject area of research, developments with the strength of materials, mathematical statistics and probability theory.*

Findings. *Is presented the possibility of using at the design stages for calculations of determine the statistical characteristics of the fatigue resistance of details at limited data on the mechanical characteristics of the strength of the material. The research results make it possible to take reasonable proposals to improve the fatigue strength of details.*

Originality. *The further development of the theory and methodology of mathematical solutions for designing machine parts with specified reliability characteristics by the fatigue strength criterion while minimizing their weight and size.*

Practical value. *Is presented information that improves the quality and efficiency of design solutions for ensure the specified reliability of details. The calculation is performed on the example of cylindrical coil springs with a wide range of changes in their geometric, elastic and force parameters.*

Keywords: *design, calculation, cylindrical coil spring, fatigue resistance, statistical strength characteristics.*

УДК 697.329

РУСУ О. П., ГАЙ Д. О., УСТЕНКО А. Ю.

Одеська національна академія зв'язку ім. О. С.Попова

ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ У СИСТЕМАХ ОБІГРІВУ ПРИМІЩЕНЬ

Мета. Визначення найбільш простих способів використання сонячних колекторів для обігріву приміщень.

Методика. Аналіз існуючих технічних рішень використання сонячних колекторів для обігріву приміщень за критерієм простоти інтеграції в існуючі інженерні системи будівель.

Результати. Визначено два способи використання сонячних колекторів для обігріву приміщень, що дозволяють легко інтегрувати їх в існуючі інженерні системи будівель.

Наукова новизна. Обґрунтовано використання повітряних сонячних колекторів для обігріву приміщень як у якості автономних пристроїв, так і у складі інтегрованих опалювально-вентиляційних систем. Обґрунтована інтеграція сонячних колекторів у існуючі системи кондиціонування з використанням у якості теплоносія фреону, що дозволить використовувати їх у опалювальний період.

Практична значимість. Запропоновані способи використання сонячних колекторів можуть стати основою для розробки нових пристроїв та систем для обігріву приміщень, що дозволять зменшити витрати органічних видів палива та рівень екологічного навантаження на довколишнє середовище.

Ключові слова: сонячний колектор, кондиціонер, система обігріву, тепловий насос, альтернативна/сонячна енергетика.

Вступ. Необхідність зменшення використання традиційних енергоресурсів, що призводять до збільшення рівня концентрації рівня CO₂ є актуальною проблемою сьогодення, яка стоїть перед усім світом [1]. Зменшення рівня споживання органічних видів палива можливе шляхом заміщення їх альтернативними енергоресурсами, одним із яких є сонячна енергетика [2]. У [3, 4] показано, що сумарна кількість сонячної енергії за опалювальний період на території України може досягати 1 ГДж/м² [4], причому ці дані добре корелюються з міжнародними методиками розрахунку [5]. Якщо утилізувати хоча б четверту частину цієї енергії, то вийде, що один приватний будинок з розмірами 10 м x 10 м і висотою 3 м, розташований, наприклад, в Одеській області, за опалювальний період зможе отримати додаткову енергію:

$$\begin{aligned} & (Q_{Пн}S_{Пн} + Q_{Сх}S_{Сх} + Q_{Пд}S_{Пд} + Q_{Зх}S_{Зх} + Q_{Дх}S_{Дх})/4 = \\ & = (248 \cdot 30 + 454 \cdot 30 + 881 \cdot 30 + 480 \cdot 30 + 876 \cdot 100)/4 \approx 37 \text{ ГДж}; \end{aligned}$$

де $Q_{Пн}$, $Q_{Сх}$, $Q_{Пд}$, $Q_{Зх}$, $Q_{Дх}$ – сумарна кількість енергії, що отримує за опалювальний період один квадратний метр вертикальної (орієнтованої, відповідно, на північ, схід, південь та захід) та горизонтальної поверхні будівлі, розташованої в Одеській області (МДж/м²) [4]; $S_{Пн}$, $S_{Сх}$, $S_{Пд}$, $S_{Зх}$, $S_{Дх}$ – повна площа цих поверхонь (м²). Така кількість енергії дозволяє заощадити на опалення приблизно 1000 м³ природного газу із, що відповідає майже 2 тонам CO₂ на рік.

Одним із способів утилізації енергії Сонця є використання сонячних колекторів. Однак на сьогоднішній день більшість присутніх на українському ринку сонячних колекторів орієнтовані на системи гарячого водопостачання. Використання їх у системах опалення пов'язано із необхідністю істотної модернізації існуючих інженерних систем будівель, що істотно стримує їх практичне використання.

Перспективними напрямками утилізації енергії сонячного випромінювання для обігріву приміщень є використання повітряних сонячних колекторів [6] та інтеграція їх із тепловими насосами [7 – 9]. Однак в Україні цей напрямок поки що не набув великого поширення, хоча існуючі дослідження [10] показують його перспективність. Крім того, незважаючи на велику кількість методів використання сонячних колекторів для обігріву приміщень, в умовах України доцільно використовувати в першу чергу ті, які потребують мінімальної переробки існуючих інженерних систем будівель, але кількість подібних досліджень в Україні також обмежена.

Постановка завдання. Визначення способів використання сонячних колекторів для обігріву приміщень з простою інтеграцією їх в існуючі інженерні системи будівель.

Результати дослідження. Спрощена типова схема системи обігріву приміщень із використанням сонячних колекторів показана на рис. 1. Як видно із рисунка, у більшості випадків сонячні колектори повинні мати окремий ізольований контур циркуляції теплоносія, у якості якого використовується незамерзаюча рідина (у більшості випадків – пропіленгліколь $C_3H_8O_2$). Це значно ускладнює систему і потребує використання додаткового обладнання, для встановлення якого інколи не має місця.

Найпростішим способом утилізації сонячного випромінювання для обігріву приміщень є використання повітряних сонячних колекторів. І хоч повітря має менший коефіцієнт теплопровідності, порівняно із водою або антифризом, використання його у якості теплоносія має ряд суттєвих переваг.

1. Система обігріву приміщення призначена для підігріву повітря, тому використання у якості теплоносія повітря не потребує окремих ізольованих контурів для циркуляції теплоносія, що значно спрощує інтеграцію сонячного колектора у існуючу систему. У самому простішому випадку, наприклад, коли сонячний колектор розташований безпосередньо на стіні будівлі, для його роботи потрібно зробити мінімально лише два отвори (рис. 2).

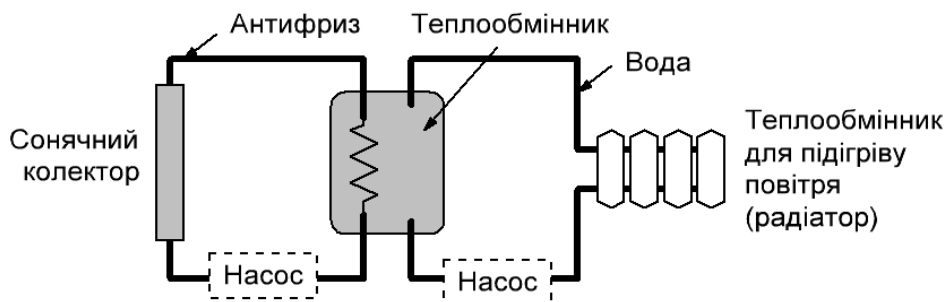


Рис. 1. Спрощена схема системи опалення з використанням сонячних колекторів

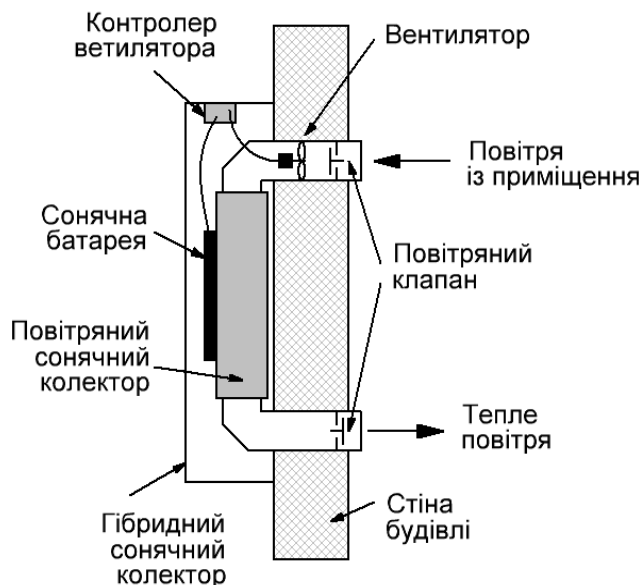


Рис. 2. Обігрів приміщення за допомогою повітряного сонячного колектора

2. Така система може працювати цілком автономно і не потребує інтеграції з існуючими системами. У ясний день, при значному рівні сонячної інсоляції, сонячні колектори підвищують температуру у певному приміщенні, при цьому кількість теплоносія, що подається у радіатори централізованого опалення, може бути зменшена автоматично, наприклад, за допомогою індивідуальних регуляторів температури.

3. При використанні повітряних сонячних колекторів систему обігріву можна легко комбінувати із системою вентиляції, підключивши вхідний повітропровід, або його частину, до джерела чистого повітря – вивівши його або безпосередньо на вулицю, або, наприклад, на горище – де температура повітря більш висока ніж на вулиці.

4. Для живлення вентилятора, що виконує циркуляцію повітря у сонячному колекторі, можна використовувати сонячну батарею. Оскільки необхідна потужність вентилятора пропорційна рівню сонячного випромінювання і, відповідно, потужності, що генерує сонячна батарея, така система не потребує додаткових джерел електричної енергії для живлення вентиляторів, що позитивно визначиться на вартості системи. Крім того оскільки потужність вентилятора відносно мала (не більше 10 Вт), то для його живлення можна використовувати недорогі сонячні батареї із аморфного кремнію, наклеївши їх безпосередньо на абсорбер сонячного колектора. У цьому випадку сонячний колектор буде повністю автономним і потребує мінімального керування – у найпростішому випадку достатньо лише вимикача живлення вентилятора для відключення системи у літній період.

5. Повітряний сонячний колектор набагато простіший і дешевший порівняно із рідинними аналогами. Він не потребує обов'язкової повної герметизації каналів циркуляції теплоносія і може ефективно працювати при порушенні герметичності.

6. Оскільки повітряний сонячний колектор може розташовуватися безпосередньо на стіні або даху будівлі, то його теплоізоляція може додатково використовуватися для збільшення їх теплового опору. Якщо така технологія покаже свою ефективність, то у

майбутньому можна налагодити виробництво, наприклад, спеціалізованих сендвіч-панелей з інтегрованою теплоізоляцією, абсорбером, каналами для циркуляції повітря та сонячними панелями.

Іншим способом використання сонячних колекторів є підключення їх до існуючих систем кондиціонування. На сьогоднішній день в Україні вже встановлено велику кількість кондиціонерів, більшість яких використовується лише влітку для охолодження приміщень. При цьому кондиціонер, що є повітряним тепловим насосом, може працювати як у режимі охолодження, так і в режимі обігріву. Але для ефективного відбору тепла із довколишнього повітря температура зовнішнього теплообмінника повинна бути нижче температури повітря. Це призводить до того, що зимою зовнішній теплообмінник може обмерзнути, тому для більшості побутових кондиціонерів мінімальна температура довколишнього середовища у режимі обігріву дорівнює $0...-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Використання теплових насосів для обігріву приміщень є визнаною у світі енергозберігаючою технологією, оскільки при витратах $1\text{ кВт}\cdot\text{год}$ енергії, тепловий насос може перемістити до $5\text{ кВт}\cdot\text{год}$ тепла (для більшості побутових кондиціонерів ця цифра дорівнює приблизно $3\text{ кВт}\cdot\text{год}$). Таким чином, для того щоб існуючі кондиціонери могли робити в режимі обігріву приміщень, їм необхідно мати назовні джерело теплової енергії.

Саме таким джерелом може стати сонячний колектор. Якщо підключити компресор кондиціонера до абсорбера, у контурі якого циркулює фреон (рис. 3), то можна переміщувати отримане тепло у приміщення, тим самим забезпечуючи економію енергії. Серед переваг такого проекту можна виділити наступне.

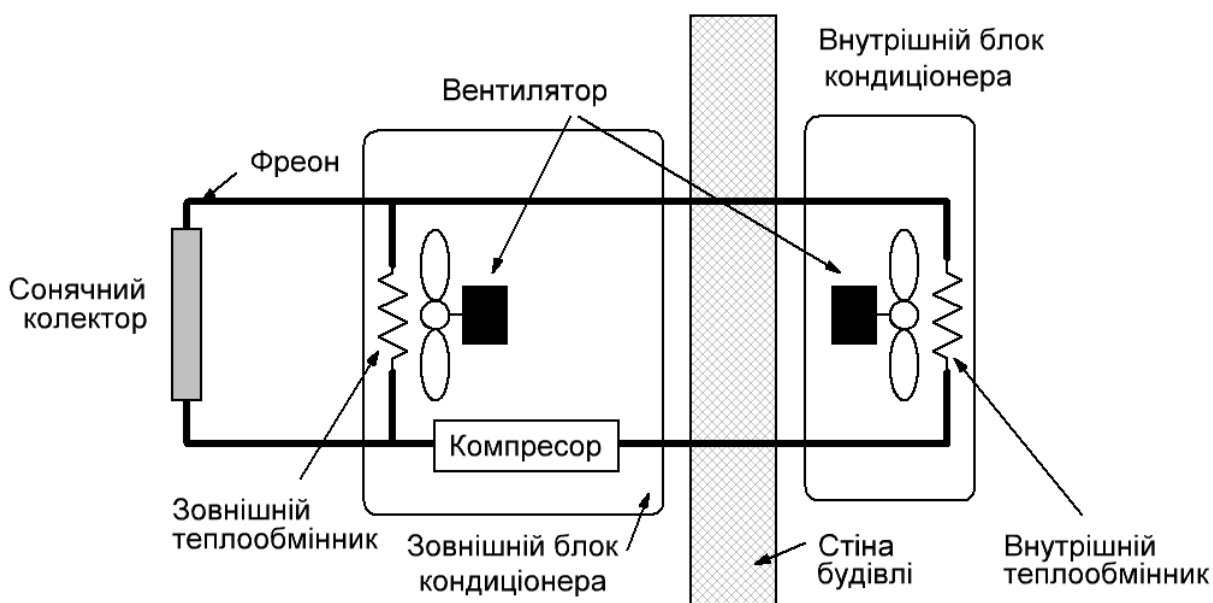


Рис. 3. Підключення сонячного колектора до кондиціонера

1. На сьогоднішній день більшість кондиціонерів вже встановлено в будівлях, причому активно використовуються як індивідуальні, так і централізовані системи кондиціонування. У даному випадку підключення їх до сонячного колектора потребує

переробки лише тієї частини системи, що знаходиться назовні без переробки внутрішніх комунікацій.

2. Так само як і у випадку використання повітряних сонячних колекторів, таку систему можна використовувати паралельно із існуючою системою обігріву без необхідності її інтеграції.

3. Теоретично кондиціонер можна живити від сонячної батареї, що наклеєна на абсорбер колектора (гібридні сонячні колектори), причому батарея може вироблювати енергію як взимку, так і влітку, коли кондиціонер працює у режимі охолодження.

4. Оскільки у контурі колектора у даному випадку буде циркулювати фреон, для використання у системі більше підійдуть вакуумні сонячні колектори, які мають найбільшу ефективність.

На жаль така система потребує модернізації більшості існуючих кондиціонерів, у першу чергу – переробки зовнішнього блока, що призведе до анулювання гарантії виробника. Але можливо у майбутньому, якщо ця технологія покаже свою ефективність, виробники відповідного обладнання почнуть виробництво кондиціонерів нового типу у яких можливість підключення зовнішнього сонячного колектора буде штатною опцією або зовнішній блок зможе безпосередньо виконувати функцію сонячного колектора.

На сьогоднішній день без істотної переробки обладнання реалізувати цей проект можна на основі мобільних кондиціонерів з функцією обігріву. У цьому випадку два повітропроводи, що виходять назовні, можна підключити до повітряного сонячного колектора, який буде розташований, наприклад на зовнішній стороні стіни будівлі (рис. 4). Причому влітку, коли у використанні сонячного колектора немає потреби його можна легко від'єднати, тим самим повернувши систему у первісний стан. Але на жаль таке обладнання на сьогоднішній день використовується дуже рідко.

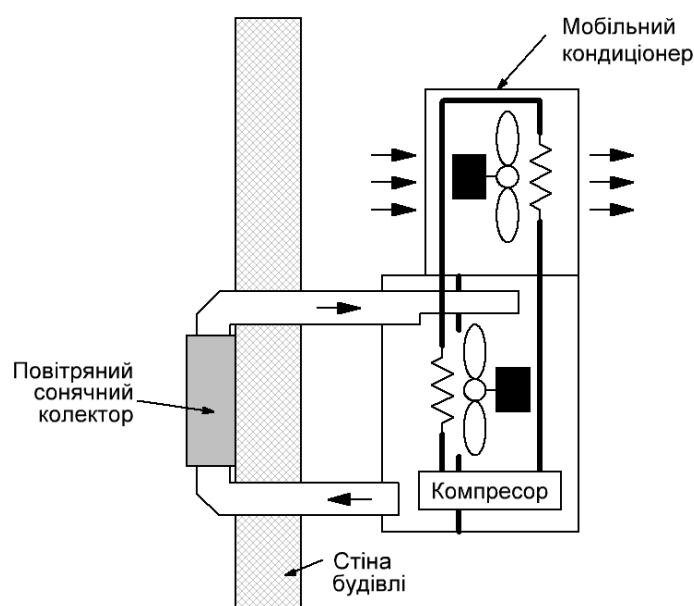


Рис. 4. Підключення повітряного сонячного колектора до мобільного кондиціонера

Висновки. Використання сонячних колекторів для обігріву приміщень має великий потенціал і потребує подальших досліджень, для проведення яких на базі Одеської національної академії зв'язку ім. О.С.Попова у рамках науково-дослідної роботи планується створити кілька експериментальних установок. У першу чергу будуть проведені дослідження ефективності повітряних сонячних колекторів виготовлених на базі існуючих огорожувальних конструкцій будівель. Наприклад, на думку авторів, одним із перспективних напрямків може стати використання у якості абсорбера металочерепиці дахів, а також розробка та дослідження різних варіантів сендвіч-панелей. Також планується переробка одного із встановлених кондиціонерів та підключення в його систему сонячного колектора, виготовленого, наприклад, на основі теплообмінника від побутового холодильника.

Література

1. Lorraine Chow Earth's Average CO₂ Levels Cross 410 ppm for the First Month Ever. Режим доступу: <https://www.ecowatch.com/earth-co2-levels-fossil-fuels-2565799028.html>
2. Ніконова В. Н. Аналіз ефективності впровадження сонячних колекторів в Україні // В.Н. Ніконова / Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – Випуск 3 (28). – 2016. – С.145 – 147.
3. Проектування. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорту будинків при новому будівництві та реконструкції: ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007. – К.: Мінрегіонбуд. України. – 2008. – 44 с.
4. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія: ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. – К.: Мінрегіонбуд України. – 2011. – 124 с.
5. Білоус О. М. Методи розрахунку сонячних теплових надходжень / О.М. Білоус // Будівельні конструкції. – 2013. – Вип. 77. – С. 188–191.
6. Andrei-Stelian Air solar collectors in building use - A review / Andrei-Stelian Bejan, Abdelouhab Labihi, Cristiana Croitoru Tiberiu Catalina // E3S Web of Conferences 32, 01003 (2018). – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183201003>
7. Putāns H. Solar collector with heat pump / Putāns, H., Ziemelis, I., Jesko, Ž., Kristutis, I // 7 th International scientific conference „Engineering for rural development”. – С. 29-30.
8. Poppi S. Solar heat pump systems for heating applications: Analysis of system performance and

References

1. Lorraine Chow Earth's Average CO₂ Levels Cross 410 ppm for the First Month Ever. Access mode: <https://www.ecowatch.com/earth-co2-levels-fossil-fuels-2565799028.html>
2. Nikonorova V. N. Analiz efektyvnosti vprovadzhennia soniachnykh kolektoriv v Ukraini [Analysis of the effectiveness of the implementation of solar collectors in Ukraine] // V.N. Nikonorova / Visnyk Sumskoho natsionalnogo ahrarnoho universytetu. Seriiia «Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychkyh protsesiv». – Vypusk 3 (28). – 2016. – P.145 – 147.
3. Proektuvannia. Nastanova z rozroblennia ta skladannia enerhetychnoho pasporta budynkiv pry novomu budivnytstvi ta rekonstruktsii [Designing. Guidelines for the development and assembly of energy passports for buildings under new construction and reconstruction]: DSTU-N B A.2.2-5:2007. – K.: Minrehionbud. – Ukraine, 2008. – 44 p.
4. Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivelna klimatolohiia [Protection from dangerous geological processes, harmful operational influences, from fire. Construction Climatology]: DSTU-N B V.1.1-27:2010. – K.: Minrehionbud Ukrainy. – 2011. – 124 p.
5. Bilous O. M. Metody rozrakhunku soniachnykh teplovykh nadkhodzhen [Methods of calculation of solar heat revenues] / O. M. Bilous // Budivelni konstruktsii. – 2013. – Vyp. 77. – P. 188–191.
6. Andrei-Stelian Air solar collectors in building use - A review / Andrei-Stelian Bejan, Abdelouhab Labihi, Cristiana Croitoru Tiberiu Catalina // E3S Web of Conferences 32, 01003 (2018). – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183201003>
7. Putāns H. Solar collector with heat pump / Putāns, H., Ziemelis, I., Jesko, Ž., Kristutis, I // 7 th International scientific conference „Engineering for rural development”. – С. 29-30.

possible solutions for improving system performance. – KTH Royal Institute of Technology, 2017. – 111 с.

9. Majid Z. A. A. et al. Multifunctional solar thermal collector for heat pump application // Proceedings of the 3rd WSEAS int. conf. on renewable energy sources. – 2009. – С. 342-346.

10. Пахолук О. А. Дослідження роботи плоских сонячних повітряних колекторів / О.А. Пахолук, А. Л. Ящинський // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – 2015. – Вип. 4. – С. 139 – 144.

8. Poppi S. Solar heat pump systems for heating applications: Analysis of system performance and possible solutions for improving system performance. – KTH Royal Institute of Technology, 2017. – 111 с.

9. Majid Z. A. A. et al. Multifunctional solar thermal collector for heat pump application // Proceedings of the 3rd WSEAS int. conf. on renewable energy sources. – 2009. – С. 342-346.

10. Pakholiuk O. A. Doslidzhennia roboty plaskykh soniachnykh povitrianykh kolektoriv [Research a work of flat solar air collectors] / O. A. Pakholiuk, A. L. Yashchynskiy // Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. – 2015. – Vyp. 4. – P. 139 – 144.

RUSU ALEXANDER

shurusu@ukr.net;

ORCID: 0000-0002-7315-2537;

Ph.D., Senior Lecturer of the Department of automation of processes and power supply;

A.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications

GAI DMITRY

dmitry_olegovich@ukr.net

A.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications

USTENKO ANASTASIA

ustenkon@ukr.net

A.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ В СИСТЕМАХ ОБОГРЕВА ПОМЕЩЕНИЙ

РУСУ А. П., ГАЙ Д. О., УСТЕНКО А. Ю.

Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова

Цель. *Определение наиболее простых способов использования солнечных коллекторов для обогрева помещений.*

Методика. *Анализ существующих технических решений использования солнечных коллекторов для обогрева помещений по критерию простоты интеграции в существующие инженерные системы зданий.*

Результаты. *Определены два способа использования солнечных коллекторов для обогрева помещений, позволяющие легко интегрировать их в существующие инженерные системы зданий.*

Научная новизна. *Обосновано использование воздушных солнечных коллекторов для обогрева помещений как в качестве автономных устройств, так и в составе интегрированных отопительно-вентиляционных систем. Обоснованная интеграция солнечных коллекторов в существующие системы кондиционирования с использованием в качестве теплоносителя фреона, что позволит повысить их эффективность в отопительный период.*

Практическая значимость. *Предложенные способы использования солнечных коллекторов могут стать основой для разработки новых устройств и систем для обогрева помещений, позволяющих уменьшить затраты органических видов топлива и уровень экологической нагрузки на окружающую среду.*

Ключевые слова: *солнечный коллектор, кондиционер, система обогрева, тепловой насос, альтернативная/солнечная энергетика.*

USING SOLAR COLLECTORS IN THE BUILDING HEATING SYSTEMS

RUSU A. P., GAI D. O., USTENKO A. Y.

A.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications

Purpose. *Determination the easiest ways to use solar collectors for building heating.*

Methodology. *Analysis of existing technical solutions for the use of solar collectors for building heating by the criterion of simple integration into existing engineering systems of buildings.*

Findings. *Two ways of using solar collectors for building heating making easy to integrate into existing engineering systems of buildings are proposed.*

Originality. *The use of solar air collectors for building heating both as autonomous devices and as part of integrated heating and ventilation systems is substantiated. The integration of solar collectors into existing air conditioning systems using Freon as a coolant, which will increase their efficiency during the heating season, is substantiated.*

Practical. *The proposed methods of using solar collectors can be the basis for the development of new devices and systems for building heating, which can reduce the quantity of organic fuels and the level of environmental pressure on the environment.*

Keywords: *solar collector, air conditioning, heating system, heat pump, alternative / solar energy.*

УДК 378.147

КАПЛУН В. В., ШВЕДЧИКОВА І. О., КРАВЧЕНКО О. П.,
ШЕВЧЕНКО О. О.

Київський національний університет технологій та дизайну

КОМПЛЕКСНА ОСВІТНЯ ПЛАТФОРМА ПРОЕКТНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ У СФЕРІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Мета. Застосування комплексного підходу щодо створення цілісної освітньої платформи проектної діяльності в сфері енергоефективності.

Методика. Використовуються відомі особистісно-орієнтовані методики забезпечення якості освітніх послуг як базові чинники створення комплексного набору навичок, знань і компетенцій у сфері енергоефективності та інноваційний процес їх отримання для слухачів з різною базовою професійною підготовкою.

Результати. Реалізація проектно-орієнтованої освітньої платформи передбачає використання особистісно-орієнтованих технологій навчання з застосуванням бази інженерних та наукових проектів для підвищення енергоефективності, дозволяє еластично формувати наповнення модулів багаторівневої підготовки слухачів з унікальним для кожного набором практичних навичок, знань і компетенцій з використанням інноваційного процесу їх отримання.

Наукова новизна. В роботі сформовані базові принципи створення освітньої платформи проектної діяльності у сфері енергоефективності, компоненти якої мають багаторівневу структуру для підготовки та підвищення кваліфікації, реалізовану у вигляді взаємозв'язаних модулів, курсів, тренінгів, які дозволяють обрати індивідуальну освітню траєкторію слухачу з урахуванням напряму спеціалізації та професійних інтересів.

Практична значимість. Результати дослідження можуть бути використані при створенні освітньо-наукових центрів енергоефективності для підтримки розвитку сфер енергоефективності та відновлюваної енергетики, комплексного забезпечення професійної підготовки представників бізнесу, громадських закладів, фахових спілок та науково-дослідних інститутів, які б хотіли отримати знання про розвиток та втілення енергоефективних проектів, а також при організації програмних заходів та ініціатив із міжнародними представниками, які беруть участь у їх впровадженні.

Ключові слова: енергоефективність, енергозбереження, освітня платформа, проектна діяльність, центр енергоефективності, комплексний підхід.

Вступ. В сучасних умовах проблема енергозбереження та енергоефективності набуває глобального характеру. Це пов'язано з вичерпаністю традиційних видів енергоресурсів, нестабільністю цін на них, погіршенням екології навколишнього середовища. В останні часи до вказаних чинників додається також загальна нестабільність у регіонах видобутку паливно-енергетичних ресурсів.

Світовий досвід свідчить, що лише там відбулось швидке досягнення міжнародної конкурентоспроможності держави, де наріжним каменем державної політики постала енергоефективність [1].

Останнім часом в Україні було прийнято низку важливих законів, які сприяли закладенню фундаменту для реалізації політики підвищення енергетичної ефективності, зокрема Закони України «Про енергетичну ефективність будівель» (від 22.06.2017 № 2118-VIII), «Про комерційний облік теплової енергії та водопостачання» (від 22.06.2017 № 2119-VIII), «Про приєднання України до Статуту Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA)» (від 05.12.2017 № 2222-VIII). Продовжується робота по створенню законодавчого підґрунтя для впровадження нової системи стимулювання розвитку

відновлюваної енергетики; покращення інвестиційних можливостей у сфері виробництва електричної енергії з альтернативних джерел; запровадження ринку твердого біопалива; розвитку високоефективної когенерації тощо. Згідно енергетичної стратегії України на період до 2035 року (Розпорядження КМУ № 605-р від 18 серпня 2017 р.) гнучкість розвитку енергетичної галузі може бути забезпечена завдяки використанню можливостей енергоефективних технологій та інвестицій, а її сталий розвиток має стати першим кроком для оздоровлення та зростання конкурентоспроможності економіки країни в цілому.

У відповідності до схваленої Урядом України Концепції впровадження механізмів стабільного фінансування заходів з енергоефективності (Розпорядження КМУ № 489-р від 13 липня 2016 р.) створений Фонд енергоефективності. Основною метою його діяльності є масштабне та швидке здійснення енергоощадних заходів, створення фінансових інструментів для інвестицій у енергоефективність, зменшення витрат на енергозабезпечення будівель. Реалізація системних рішень, передбачених Концепцією, дозволить зменшити споживання та імпорт природного газу (1,5 млрд. м³ на рік), витрати державного бюджету на фінансування субсидій (5,0 млрд. грн. на рік), сприятиме створенню нового ринку енергоефективних заходів, нових робочих місць (до 75 тис.), збільшенню податкових надходжень до державного та місцевих бюджетів (до 10 млрд. грн. на рік) тощо.

Практична реалізація державної політики з підвищення енергоефективності потребує відповідного кадрового забезпечення, зокрема, висококваліфікованих спеціалістів з розробки та впровадження технологій, відновлювальних джерел енергії, енергоефективних систем електро-, тепло- та водопостачання тощо. Так, Законом України «Про енергетичну ефективність будівель» [2] передбачено проведення професійної атестації осіб, які мають намір провадити діяльність із сертифікації енергетичної ефективності та обстеження інженерних систем. Для здійснення ефективною сертифікації будівель та надання правильних рекомендацій щодо підвищення їхнього рівня енергоефективності важливим елементом є якісна підготовка експертів з енергоефективності. В Україні бракує спеціалістів, які знайомі з практичною теорією енергоменеджменту та втіленням її в життя. Потребує удосконалення просвітницька діяльність серед різних верств населення щодо формування громадської думки та твердження енергозберігаючого способу життя [3].

Для комплексної реалізації заходів, спрямованих на суттєве зменшення споживання енергоносіїв, необхідно насамперед, розробити науково-технічні засади створення цілісної освітньої платформи у відповідності до діючих нормативів, а саме:

- зменшення видатків на оплату енергоносіїв за рахунок впровадження сучасних технологій у сфері енергозбереження та підвищення енергоефективності;
- підвищення надійності функціонування і розвиток інженерних систем енергозабезпечення, зниження витрат на енергоспоживання шляхом поетапного впровадження проектів комплексного використання енергоощадних технологій;
- формування науково-обґрунтованої технічної, економічної й управлінської політики енергоощадності, розробка на її основі системи організаційних, техніко-технологічних заходів, спрямованих на підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів.

Стає очевидним, що для вирішення такого роду завдань необхідно впроваджувати нові засади надання освітніх послуг для широкого кола фахівців, які будуть здатні

формувати нову енергетичну культуру в усіх сферах життя та виховувати нове енергосвідоме покоління. Очевидно, що адаптивний принцип формування освітніх програм для підготовки фахівців у сфері енергозбереження та енергоефективності повинен забезпечувати основу професійної і суспільної діяльності енергоменеджерів, енергоаудиторів, управителів житлово-комунальних господарств, інженерного персоналу підприємств, працівників органів державної влади тощо.

Таким чином, викладене вище свідчить про актуальність пошуку нових підходів до здійснення освітньої діяльності в сфері енергозбереження та енергоефективності.

Аналіз попередніх досліджень. На сьогодні в багатьох закладах вищої освіти України існують структурні підрозділи (центри енергозбереження), основним завданням яких є освітня діяльність, зокрема підготовка та підвищення кваліфікації фахівців в сфері енергозбереження та енергоефективності. Крім надання освітніх послуг такі центри здійснюють також енергетичні обстеження; надають консалтингові послуги з раціонального перетворення та використання енергії; займаються інформаційною підтримкою проектів з підвищення енергоефективності. Так, заслуговує на увагу багаторічний досвід впровадження інноваційних форм освітньої діяльності в сфері енергозбереження, накопичений в Інституті енергозбереження та енергоменеджменту при національному технічному університеті «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Об'єднуючим майданчиком зі спілкування та обміну досвідом між фаховими спеціалістами з енергозбереження та енергоефективності і широким колом слухачів стала Міжнародна науково-практична конференція «Енергоефективний університет», яку вже кілька років поспіль проводить Київський національний університет технологій та дизайну.

Стратегічні напрями діяльності закладів вищої освіти щодо управління енергоефективністю шляхом впровадження організаційних, техніко-технологічних заходів і матеріального стимулювання енергозбереження та підвищення енергоефективності за рахунок внутрішнього потенціалу університетів висвітлені в роботі [4]. В [5] представлені можливості сучасного лабораторного обладнання, розробленого міжуніверситетською групою вчених, впровадження якого сприятиме модернізації та інформатизації навчального процесу у професійно-технічних навчальних закладах. Наведено структуру та приклади використання обладнання при викладанні дисциплін інженерно-технічного та природничого напрямків, зокрема, енергозбереження. Розглянуто особливості та переваги концепції використання електронних цифрових лабораторій у навчальному експерименті.

Енергетичні компанії та організації також здійснюють різноманітні освітні проекти. Наприклад, компанія «Київенерго» вже кілька років здійснює в Києві проект «Енергоефективні школи», спрямований на освіту школярів, який надає їм можливість навчитися основним принципам енергозбереження та енергоефективності [6].

У той самий час аналіз та узагальнення досвіду впровадження освітньої діяльності у сфері енергозбереження та енергоефективності показав, що в умовах активізації проектною діяльністю необхідно розвивати інші особистісно-орієнтовані підходи для забезпечення якісно нового рівня освітніх послуг. В існуючих публікаціях досліджено лише окремі аспекти цієї проблематики. Як приклад, можна відзначити наукові роботи [7-9]. Так, в [7] розкрито значення освітнього аспекту в формуванні енергоощадного мислення та визначені

педагогічні умови впровадження енергоощадної політики. Аналіз ролі професійної освіти та фахової підготовки студентів в сфері енергозбереження здійснений в [8, 9].

Постановка завдання. Для підготовки нового покоління фахівців, у яких осядливе ставлення до енергоресурсів буде покладене в основу їх професійних обов'язків, необхідно розробити концептуальні засади застосування комплексного підходу до освітньої діяльності, зокрема до побудови інноваційної освітньої платформи, впровадження якої створить передумови для успішної проектної діяльності в сфері енергоефективності.

Результати дослідження. Для побудови інноваційної освітньої платформи проектної діяльності в сфері енергозбереження та енергоефективності пропонується концепція (рис. 1), яка являє собою систему загальних поглядів, необхідних для цілеспрямованого і оптимального вирішення поставленого завдання [10].



Рис.1. Концепція побудови освітньої платформи проектної діяльності у сфері енергоефективності

Будь-яка концепція має свою структуру та складові елементи (ідею, мету, завдання концепції тощо). Метою концепції, яка пропонується в статті, є розроблення цілісної освітньої платформи проектної діяльності в сфері енергоефективності.

Слід зазначити, що до сих пір не існує загальноживаного тлумачення терміну «освітня платформа». Найчастіше цей термін використовують у вузькому значенні, пов'язуючи його з інтернет-освітою. Так, в [11], наприклад, під освітньою платформою розуміють обмежений, особисто-орієнтований інтернет-ресурс, який містить різноманітні навчальні матеріали та надає їх у користування на тих чи інших умовах. В межах даної роботи під освітньою платформою проектної діяльності у сфері енергоефективності (ОППДЕ) будемо розуміти унікальний для кожного набір практичних навичок, знань і компетенцій у сфері енергоефективності та інноваційний процес їх отримання для слухачів з різною базовою професійною підготовкою. Науково-методичною основою побудови освітньої платформи при впровадженні освітньої діяльності у сфері енергоефективності є комплексний підхід, при якому реалізується бачення об'єкта з найрізноманітніших позицій в їх цілісності та системності [12].

Реалізація проектно-орієнтованої освітньої платформи передбачає використання технології навчання із застосуванням бази інженерних та наукових проектів, а також комплексу навчальних програм з енергозбереження та енергоефективності (рис. 1).

База проектів з енергозбереження та енергоефективності може охоплювати:

- інженерні проекти з підвищення енергоефективності будівель та інженерних систем;
- інженерні проекти з підвищення енергоефективності закладів вищої освіти;
- наукові проекти фундаментальних та прикладних досліджень, а також проекти науково-технічних (експериментальних) розробок у сфері енергоефективності.

Компоненти ОППДЕ мають багаторівневу структуру підготовки та підвищення кваліфікації, реалізовану у вигляді взаємозв'язаних модулів або курсів, тренінгів, що забезпечують вибір індивідуальної освітньої траєкторії з урахуванням напрямку професійної спеціалізації та інтересів кожного слухача.

Модуль - складова частина освітньої платформи, що реалізує певні задачі освітнього процесу. Змістовні модулі можуть бути задіяні незалежно один від одного, так і разом з іншими модулями платформи, створюючи необхідний освітній кейс. Модулі об'єднуються в кейси при роботі в групах та вирішенні завдань навчання широкої направленості із залученням спеціалістів різного профілю. Співпраця між групами, коли слухачі різних спеціальностей, рівнів підготовки та вікових груп об'єднуються навколо певної проблеми та вирішують її разом, є основою кейсового підходу до навчального процесу [13, 14].

Освітня платформа з енергозбереження та енергоефективності може охоплювати наступні модулі (рис. 2): нормативно-правова база енергозбереження та енергоефективності; види енергоресурсів та інформаційно-вимірювальні системи їх обліку; енергозберігаючі технології в системах постачання енергоресурсів; сучасні енергозберігаючі технології; енергоефективні огорожувальні конструкції; енергоаудит та його інструментальне забезпечення; економіко-управлінські питання проведення енергетичних обстежень. Перелік модулів та їх наповнення постійно удосконалюється та оновлюється, виходячи з потреб потенційних користувачів освітньої платформи.

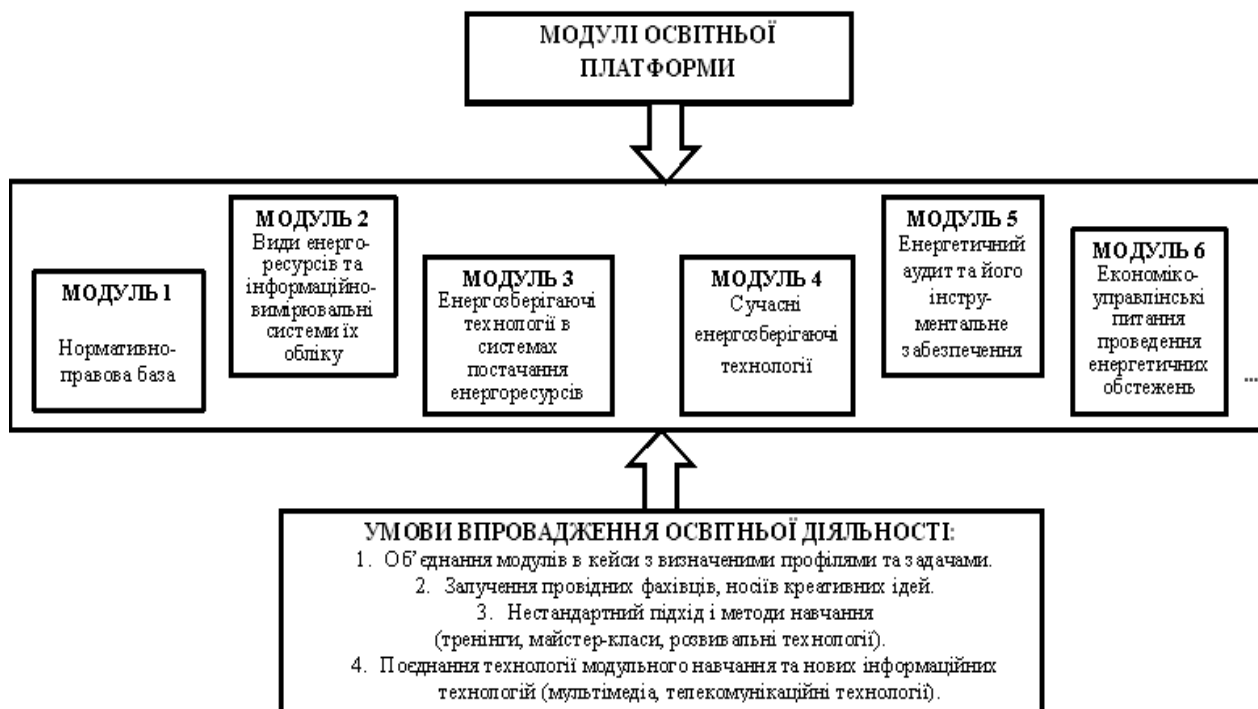


Рис. 2. Приклад модулів освітньої платформи

Платформа дозволяє еластично формувати наповнення для багаторівневої підготовки слухачів:

рівень 1 - базовий, що забезпечує формування загальної бази знань, які використовуються при здійсненні професійної діяльності у сфері реалізації проектів енергоефективності, міжнародна та національна нормативна база щодо їх забезпечення;

рівень 2 - спеціалізований або поглиблений у напрямку професійної спеціалізації слухача, що забезпечує занурення в ту чи іншу предметну область або сферу спеціалізованих знань;

рівень 3 - професійний, що забезпечує підготовку енергоаудиторів, енергоменеджерів, адміністраторів, керівників проектів в сфері управління інноваційними проектами та розробки техніко-технологічних рішень у сфері енергозбереження та підвищення енергоефективності.

Особливістю структурної побудови ОППДЕ є:

- компетентнісний підхід, орієнтований на конкретні результати навчання;
- проектно-орієнтована форма навчання;
- інтегроване навчання (одержання нових знань та практичних навичок шляхом тісної міждисциплінарної інтеграції навчальних програм);
- використання активних методів навчання з застосуванням лабораторного обладнання;
- участь слухачів у спільних науково-дослідних роботах;
- проходження практичного навчання на підприємствах, що працюють на ринку послуг у сфері енергоефективності.

Багатофункціональним фундаментом ОППДЕ (рис. 1) є міжкафедральний освітньо-науковий центр енергоефективності, який виступає як:

- демонстраційна зона кращих практик та техніко-технологічного обладнання для зменшення споживання енергоносіїв;

- навчальний простір з можливістю використання обладнання центру (приладів, експериментальних комплектів, демонстраційних компонентів, спеціалізованих стендів з діючими установками, пристроями моделювання процесів та вимірювальними засобами) для організації різних форм навчання;

- практична платформа для підготовки енергоменеджерів та енергоаудиторів за міжнародними стандартами, підвищення їх кваліфікації, надання консультацій та розроблення готових рішень у сфері енергоефективності і «чистої» енергетики для приватних домогосподарств, ОСББ, промислових об'єктів тощо.

Передумовою створення центру енергоефективності є основні нормативно-правові документи України у сфері енергозбереження, які забезпечують проведення цілеспрямованої політики держави з організації та координації дій у сфері енергозбереження, розроблення цільових, регіональних, місцевих та інших програм.

Функціонування центру енергоефективності здійснюється на засадах державно-приватного партнерства для забезпечення його конкурентоспроможності та створення сприятливого іміджу. Тому важливим напрямком роботи центру є пошук партнерів та налагодження сталих стосунків з міжнародними донорськими та грантовими організаціями і компаніями з метою залучення фінансування для впровадження інноваційних технологій у сфері енергоефективності та участі у міжнародних конкурсах. Так, наприклад, підтримку у створенні освітньо-наукового центру енергоефективності Київського національного університету технологій та дизайну надали Держенергоефективності, проект GIZ «Реформа сектору енергоефективності», проект ПРООН в Україні «Усунення перепон для залучення інвестицій у підвищення енергоефективності громадських будівель у малих і середніх містах України на основі моделі ЕСКО» та партнери зі сфери бізнесу.

При впровадженні освітньої діяльності на основі запропонованої концепції ОППДЕ викладання навчального матеріалу має відбуватися із залученням досвідчених викладачів профільних кафедр університету; провідних фахівців та професіоналів з енергоменеджменту; представників фірм-партнерів університету, які є носіями креативних ідей та можуть використовувати нестандартні підходи до навчання (тренінги, майстер-класи, воркшопи тощо) [14, 15]. Одержання вагомого освітнього ефекту можливе на основі поєднання технологій модульного навчання та інформаційно-комунікаційних технологій (мультімедіа, технологій дистанційного навчання, інтернет-конференцій).

Враховуючи вищезазначене, можна стверджувати, що практична реалізація сформованої концепції забезпечить створення інноваційної освітньої платформи проектної діяльності у сфері енергоефективності.

Висновки. В статті висвітлені основні принципи та особливості застосування комплексного підходу щодо створення освітньої платформи для проектної діяльності у сфері енергоефективності на базі міжкафедрального освітньо-наукового центру енергоефективності як демонстраційної зони кращих практик та техніко-технологічного обладнання для зменшення споживання енергоносіїв. В основі навчального процесу лежить

інноваційна освітня модель з реалізацією модульного підходу, об'єднанням у відповідні кейси шляхом залучення різних фахівців для комплексної проектної діяльності у сфері енергозбереження та енергоефективності. Освітня діяльність здійснюється за допомогою організації навчальних семінарів, сесій, тематичних курсів, тренінгів, що проводяться у формі очного або очно-заочного навчання на основі технологій дистанційного навчання з використанням ІКТ. Важливою особливістю створення та впровадження освітньої платформи проектної діяльності у сфері енергоефективності є можливість побудови індивідуальної освітньої траєкторії слухача.

Література

1. Енергетична ефективність України. Кращі проектні ідеї [електронне видання] : Проект «Професіоналізація та стабілізація енергетичного менеджменту в Україні» / Уклад.: С. П. Денисюк, О. В. Коцар, Ю. В. Чернецька. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 79 с.: Режим доступу: http://io.iee.kpi.ua/sites/default/files/HANDBOOK_of_BEST_PRACTICES2.pdf.
2. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» / Відомості Верховної Ради (ВВР), 2017, № 33, ст. 359.
3. Денисюк С. П. Формування політики підвищення енергетичної ефективності – сучасні виклики та європейські орієнтири / С. П. Денисюк // Енергетика: економіка, технології, екологія. - 2013. - №2. – С. 7-22.
4. Каплун В. В. Управління енергоефективністю в університетах / В. В. Каплун, А. М. Козленко. – К.: КНУТД, 2018. - 31с.
5. Шут М. І. Використання вітчизняної цифрової електронної лабораторії при викладанні дисциплін з енергозбереження / М. І. Шут, В. В. Каплун, В. Я. Жуйков та ін. // Вісник КНУТД. – 2013. - № 6. – С. 225-230.
6. Київенерго. Освітні проекти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://kyivenergo.com/uk/osvitni-proekty>. – Назва з екрану.
7. Крутогорська Н. Ю. До проблеми економічної освіти в галузі енергозбереження / Н. Ю. Крутогорська, Я. В. Крутогорський // Проблеми сучасного педагогічного образования. – 2016. – № 52-1. – С. 48-

References

1. Denysiuk, S. P., Kotsar, O. V., Chernetska, Yu. V. (2016). Proekt «Profesionalizatsiia ta stabilizatsiia enerhetychnoho menedzhmentu v Ukraini» [Project «Professionalization and Stabilization of Energy Management in Ukraine»] *Enerhetychna efektyvnist Ukrainy. Krashchi proektni idei – Energy efficiency of Ukraine. Best project ideas*, Kyiv. KPI im. Ihoria Sikorskoho, 79. Retrieved from: http://io.iee.kpi.ua/sites/default/files/HANDBOOK_of_BEST_PRACTICES_2.pdf [in Ukrainian].
2. Zakon Ukrainy «Pro enerhetychnu efektyvnist budivel» no 33, st. 359 [Law of Ukraine «On the energy efficiency of buildings» no 33, st. 359] *Vidomosti Verkhovnoi Rady (VVR) – List of the Verkhovna Rada (VR)* (2017). [in Ukrainian].
3. Denysiuk, S. P. (2013). Formuvannia polityky pidvyshchennia enerhetychnoi efektyvnosti – suchasni vyklyky ta yevropeiski oryentyry [Formation of increasing policy of energy efficiency - current challenges and European benchmarks] *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia – Power engineering: economics, technology, ecology*, 2, 7-22 [in Ukrainian].
4. Kaplun, V. V., Kozlenko, A. M. (2018). Upravlinnia enerhoefektyvnistiu v universytetakh [Management of energy efficiency at Universities] Kyiv: KNUTD [in Ukrainian].
5. Shut, M. I., Kaplun, V. V., Zhuikov, V. Ya. (2013). Vykorystannia vitchyznianoï tsyfrovoi elektronnoi laboratorii pry vykladanni dystsyplin z enerhozberezhennia [Use of domestic digital electronic laboratory in teaching of energy saving disciplines] *Visnyk KNUTD – KNUTD Bulletin*, 6, 225-230 [in Ukrainian].
6. Kyivenerho. Osvitni proekty [Kyivenergo. Educational projects] Retrieved from <http://kyivenergo.com/uk/osvitni-proekty> [in Ukrainian].
7. Krutohorska, N. Yu., Krutohorskyi, Ya. V. (2016). Do problemy ekonomichnoi osvity v haluzi enerhozberezhennia [The problems of economic education in field of energy saving] *Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya – Problems of modern*

- 54.
8. Жуковский Ю. Л. Формирование энергоэффективного общества на основе непрерывного образования в области энергосбережения / Ю. Л. Жуковский, Н. И. Котелева // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 5-2 (37). – С. 46-47.
9. Андреев А. М. Формування професійної культури у сфері енергозбереження майбутніх учителів фізики / А. М. Андреев // Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія педагогічна. – № 19. – 2013. – С.71-73.
10. Большой энциклопедический словарь [Текст] / Гл. ред. А. М. Прохоров. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.; СПб., 2000. – 1247 с.
11. Тиунова Н. Н. Образовательные платформы как средство интенсификации профессиональной подготовки студентов колледжа / Н. Н. Тиунова // Professional education in Russia and abroad. – 2016. - № 2(22). – С. 102-108.
12. Чистоклетов Л.Г. Концептуальні засади застосування комплексного підходу в юридичних дослідженнях / Л.Г. Чистоклетов // Економіка, фінанси, право. - 2015. - № 4. – С. 27-30.
13. Кенжалиева С. З Модульная технология обучения в вузе как одно из требований современности / С. З. Кенжалиева, А. В. Григорьев // Филология и культура. Philology and Culture. – 2013. – №1(31). – С.240-243.
14. Котенко Т. М. Тренінг як засіб активізації навчання у вищій школі / Т. М. Котенко // Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету. Економічні науки. – 2009. - Випуск 16, ч. II. – С. 143-147.
15. Фопель К. Эффективный воркшоп. Динамическое обучение / К.Фопель. – М.: Генезис, 2003. – 368 с.
8. Zhukovskiy, Yu. L., Koteleva, N. I. (2014). Formirovanie energoeffektivnogo obshchestva na osnove nepreryvnogo obrazovaniya v oblasti energosberezheniya [Formation of an energy efficient society on basis of continuing education in field of energy saving] *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii – Modern scientific researches and innovations*, 5-2 (37), 46-47 [in Ukrainian].
9. Andrieiev, A. M. (2013). Formuvannia profesiinoi kultury u sferi enerhozberezhennia maibutnikh uchytelev fizyky [Formation of professional culture in field of energy saving of future physics teachers] *Zbirnyk naukovykh prats Kamianets-Podilskoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Ohienka. Seriiia pedahohichna – Collection of scientific works of Kamyanets-Podilsky National University named after Ivan Ogienko. Pedagogical series*, 19, 71-73 [in Ukrainian].
10. Prokhorov, A. M. (2000). Bol'shoy entsiklopedicheskiy slovar' [Big encyclopedic dictionary] Moscow [in Russian].
11. Tiunova, N.N. (2016). Obrazovatel'nye platformy kak sredstvo intensivatsii professional'noy podgotovki studenttov kolledzha [Educational platforms as means of intensification of professional training for college students] *Professional education in Russia and abroad*, № 2(22), 102-108 [in Ukrainian].
12. Chystokletov, L. H. (2015). Kontseptualni zasady zastosuvannia kompleksnoho pidkhodu v yurydychnykh doslidzhenniakh [Conceptual principles of application of integrated approach in Legal researches] *Ekonomika, finansy, pravo – Economics, finance, law*, 4, 27-30 [in Ukrainian].
13. Kenzhalieva, S. Z., Grigor'yev, A. V. (2013). Modul'naya tekhnologiya obucheniya v vuze kak odno iz trebovaniy sovremennosti [Modular technology of teaching at the university as one of requirements of modernity] *Filologiya i kul'tura – Philology and Culture*, 1(31), 240-243 [in Russian].
14. Kotenko, T. M. (2009). Treninh yak zasib aktyvizatsii navchannia u vyshchii shkoli [Training as a means of education activation at higher education] *Naukovi pratsi Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Ekonomichni nauky – Scientific works of the Kirovohrad National Technical University. Economic sciences*, 16, II, 143-147 [in Ukrainian].
15. Fopel', K. (2003). Effektivnyy vorkshop. Dinamicheskoe obuchenie [Effective workshop. Dynamic learning] Moscow [in Russian].

KAPLUN VIKTOR
kaplun.v@knuud.edu.ua
ORCID: 0000-0001-7040-9344
Researcher ID: B-8704-2017
Pro-Rector for Research and Innovation,
Kiev National University of Technologies & Design

SHVEDCHUKOVA IRINA
ishved89@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3005-7385
Researcher ID: O-2765-2018
Department Of Energy Management and Applied
Electronics,
Kiev National University of Technologies & Design

KRAVCHENKO OLGA
olgakravchenko111@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7262-0899
Department Of Energy Management and Applied
Electronics
Kiev National University of Technologies & Design

SHEVCHENKO OLEG
oshevchenko1@hotmail.com
ORCID: 0000-0003-0431-7307
Researcher ID: 57200147511
Director of Project Management Office,
Kiev National University of Technologies & Design

**КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА ПРОЕКТНОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**
КАПЛУН В. В., ШВЕДЧИКОВА И. А., КРАВЧЕНКО О. П., ШЕВЧЕНКО О. А.
Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Применение комплексного подхода к созданию целостной образовательной платформы проектной деятельности в сфере энергоэффективности.

Методика. Используются известные личностно-ориентированные методики обеспечения качества образовательных услуг как базовые факторы создания комплексного набора навыков, знаний и компетенций в сфере энергоэффективности и инновационный процесс их получения для слушателей с разной базовой профессиональной подготовкой.

Результаты. Реализация проектно-ориентированной образовательной платформы предусматривает использование личностно-ориентированных технологий обучения с применением базы инженерных и научных проектов для повышения энергоэффективности, позволяет эластично формировать наполнение модулей многоуровневой подготовки слушателей с уникальным для каждого набором практических навыков, знаний и компетенций с использованием инновационного процесса их получения.

Научная новизна. В работе сформированы базовые принципы создания образовательной платформы проектной деятельности в сфере энергоэффективности, компоненты которой имеют многоуровневую структуру для подготовки и повышения квалификации, реализованную в виде взаимосвязанных модулей, курсов, тренингов, которые позволяют выбрать индивидуальную образовательную траекторию слушателю с учетом направления специализации и профессиональных интересов.

Практическая значимость. Результаты исследования могут быть использованы при создании образовательно-научных центров энергоэффективности для поддержки развития сфер энергоэффективности и возобновляемой энергетики, комплексного обеспечения профессиональной подготовки представителей бизнеса, общественных заведений, профессиональных союзов и научно-исследовательских институтов, желающих получить знания о развитии и реализации энергоэффективных проектов, а также при организации программных мероприятий и инициатив с международными представителями, которые участвуют в их внедрении.

Ключевые слова: энергоэффективность, энергосбережение, образовательная платформа, проектная деятельность, центр энергоэффективности, комплексный подход.

**COMPLEX EDUCATIONAL PLATFORM
OF PROJECT ACTIVITIES IN ENERGY EFFICIENCY**
KAPLUN V. V., SHVEDCHUKOVA I. O., KRAVCHENKO O. P., SHEVCHENKO O. O.
Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. *Application of complex approach to the creation of holistic educational platform of project activities in the field of energy efficiency.*

Methodology. *The well-known personal-oriented methods of quality assurance of educational services are used as the basic factors of creating a complex set of skills, knowledge and competencies in the sphere of energy efficiency and an innovative process of obtaining them for students with different basic professional level.*

Findings. *The realization of project-oriented educational platform involves the use of personalized learning technologies with the use of base of engineering and scientific projects to increase energy efficiency; allows forming elastically the content of the modules of multi-level training of students with a unique set of practical skills, knowledge and competences for each using the innovative process of obtaining them.*

Originality. *The basic principles of educational platform for project activities in the field of energy efficiency creating are formed, the components of which have a multi-level structure for training and advanced training, implemented in the form of interconnected modules, courses, trainings that allowing to choose an individual educational trajectory for the hearer, taking into account the direction of specialization and professional interests.*

Practical value. *Research results can be used in the creation of educational and research centers of energy efficiency to support the development of energy efficiency and renewable energy sectors, comprehensive training of business representatives, public institutions, trade unions and research institutes wishing to receive knowledge about the development and implementation of energy efficient projects and also when organizing program activities and initiatives with international representatives who are involved in their implementation.*

Keywords: *energy efficiency, energy saving, educational platform, project activity, energy efficiency center, complex approach.*

УДК 621.311.24

АЛЕКСІЄВСЬКИЙ Д. Г., МАНАСЬВ К. В., ПАНКОВА О. О.,
ТАРАНЕЦЬ А. В., ШМАЛІЙ С. Л.

Запорізька державна інженерна академія

**ВІЗУАЛЬНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ
СИСТЕМИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З
АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ**

Мета. Побудова візуальної математичної моделі електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням.

Методика. В процесі побудови математичної моделі електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням була використана методика візуального моделювання. Перевірка на працездатність математичної моделі була проведена в середовищі розробки MATLAB Simulink.

Результати. Розроблена візуальна математична модель електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням, що явно включає втрати механічної потужності на валу первинної вітротурбіни.

Наукова новизна. Математичний опис електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням з урахуванням втрат механічної потужності на валу первинної вітротурбіни при нерівномірному розподілі потоків потужності між трьома вторинними аеромеханічними підсистемами розроблено вперше.

Практична значимість. Розроблена візуальна математична модель може бути використана при синтезі систем керування електромеханічною системою ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням.

Ключові слова: аеродинамічне мультиплікування, вітроенергетична установка, вітротурбіна, математична модель, механічні втрати потужності.

Вступ. Використання концепції аеродинамічного мультиплікування при побудові ВЕУ дозволяє здійснювати узгодження механічних характеристик вітротурбіни та генератора без застосування механічного мультиплікатора при високих масогабаритних показниках генератора та конструкцій ВЕУ. Проте на сьогоднішній день цей напрям у вітроенергетиці потребує розробки більш досконалих методів регулювання такими системами. Тому повинні бути створені адекватні математичні моделі електромеханічних систем для цих ВЕУ.

Постановка завдання. У роботах [1, 2] були досліджені статичні і динамічні режими роботи електромеханічної системи вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням при постійному значенні кутової швидкості на валу генератора. Була запропонована математична модель системи, однак при її побудові були прийняті деякі припущення: вторинна аеродинамічна підсистема складається з трьох ідентичних підсистем, втрати механічної потужності не були представлені явно і були враховані при опису механічної характеристики вітротурбіни. Для підвищення адекватності математичної моделі необхідно враховувати втрати потужності в явному вигляді. Розв'язанню цього питання, шляхом побудови відповідної математичної моделі електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням присвячена дана робота.

Результати дослідження. Головне рівняння руху первинної аеромеханічної підсистеми має наступний вигляд:

$$J_{1.0} \frac{d\omega_{1.0}}{dt} = M_{WT1.0} - M_t, \quad (1)$$

де M_t – сумарний момент гальмування, що створюють вторинні вітротурбіни (WT2.1, WT2.2 та WT2.3);

$M_{WT1.0}$ – момент, що створюється первинною вітротурбіною (WT1.0).

Момент гальмування складається з моментів гальмування, що створює кожна з вітротурбін:

$$M_t = \sum_{i=1}^n M_{t,i}, \quad (2)$$

де $M_{t,i}$ – момент гальмування i -ї вторинної вітротурбіни;

n – кількість вторинних аеромеханічних підсистем.

Сімейство механічних характеристик первинної вітротурбіни описується наступним виразом з використанням [3]:

$$M_{WT1.0} = \frac{\rho \cdot S_{WT1.0} \cdot V_{1.0}^3 \cdot C_{p1.0}}{2 \cdot \omega_{1.0}}, \quad (3)$$

де $V_{1.0}$ – швидкість первинного вітрового потоку;

$\omega_{1.0}$ – кутова швидкість первинної вітротурбіни;

ρ – щільність повітря;

$S_{WT1.0}$ – площа, що обметається первинною вітротурбіною;

$C_{p1.0}$ – коефіцієнт перетворення потужності первинної вітротурбіни визначається з (4).

$$C_{p1.0}(Z_{1.0}) = \begin{cases} C_{p1.0}^{\max} \cdot \left(\frac{Z_{1.0}}{Z_{1.0}^{opt}}\right)^{a_1} \cdot \left[-2 \cdot \left(\frac{Z_{1.0}}{Z_{1.0}^{opt}}\right)^{a_2} + 3\right] & \text{при } 0 < Z_{1.0} \leq Z_{1.0}^{opt} \\ C_{p1.0}^{\max} - \frac{C_{p1.0}^{\max}}{(Z_{1.0}^{xx} - Z_{1.0}^{opt})^{a_3}} \cdot (Z_{1.0} - Z_{1.0}^{opt})^{a_4} & \text{при } Z_{1.0}^{opt} < Z_{1.0} \leq Z_{1.0}^{xx} \\ C_{p1.0}^{\max} - \frac{C_{p1.0}^{\max}}{(Z_{1.0}^{xx} - Z_{1.0}^{opt})^{a_5}} \cdot (Z_{1.0} - Z_{1.0}^{opt})^{a_6} & \text{при } Z_{1.0}^{xx} < Z_{1.0} \leq \infty \end{cases} \quad (4)$$

де $Z_{1.0}$ – швидкохідність первинної вітротурбіни;

$Z_{1.0}^{opt}$, $Z_{1.0}^{xx}$ – оптимальна швидкохідність і швидкохідність холостого ходу первинної вітротурбіни, відповідно;

$a_1 \dots a_6$ – коефіцієнт апроксимації характеристики $C_{p1.0}(Z_{1.0})$;

$C_{p1.0}^{\max}$ – максимальне значення коефіцієнта перетворення потужності первинної вітротурбіни.

Момент гальмування вторинних вітротурбін визначається тангенціальною силою, що діє в площині обертання первинної вітротурбіни:

$$M_{t,i} = F_{t,i} \cdot R_{z,i}, \quad (5)$$

де $F_{t,i}$ – сила що створюється вторинною (i -ю) вітротурбіною на валу WT1.0 в точці прикладання $R_{z,i}$;

$R_{z,i}$ – радіус закріплення вторинної (i -ї) вітротурбіни.

Тангенціальна сила $F_{t,i}$ являє собою косинусоїдальну складову гальмуючого зусилля, яке створюється вторинною вітротурбіною в напрямку набігаючого результуючого повітряного потоку $V_{res,i}$:

$$F_{t,i} = F_{t,i} \cdot \cos \beta_i, \quad (6)$$

де $F_{t,i}$ – гальмуюче зусилля, яке створює WT2. i в напрямку швидкості вторинного повітряного потоку $V_{res,i}$;

β_i – кут між площиною обертання WT1.0 і напрямком результуючого вторинного повітряного потоку.

Напрямки $F_{t,i}$ і $V_{res,i}$ збігаються.

Гальмуюче зусилля $F_{t,i}$ визначається потужністю гальмування вторинної вітротурбіни:

$$F_{t,i} = \frac{P_{t,i}}{V_{res,i}}, \quad (7)$$

де $P_{t,i}$ – потужність гальмування вторинної вітротурбіни.

Потужність гальмування вторинної вітротурбіни складається з механічної потужності на валу WT2. i та потужності втрат:

$$P_{t,i} = P_{2,i} + P_{\Delta 2,i},$$

де $P_{2,i}$ – механічна потужність на валу вторинної i -ї вітротурбіни;

$P_{\Delta 2,i}$ – потужність втрат WT2. i .

Оскільки корисна потужність може бути виражена через ККД вторинної вітротурбіни η_i , то справедливе співвідношення:

$$P_{i,i} = \frac{1}{\eta_i} \cdot P_{2,i}. \quad (8)$$

У загальному випадку η_i – є функцією швидкохідності $WT_{2,i} - Z_{2,i}$:

$$\eta_i = \eta_i(Z_{2,i}). \quad (9)$$

Функція (9) може бути визначена у вигляді апроксимації експериментальних даних, що були наведені у [4].

Характеристика відносних втрат – $\Delta N(Z)$, що була наведена у [4], має вигляд представлений на рис. 1.

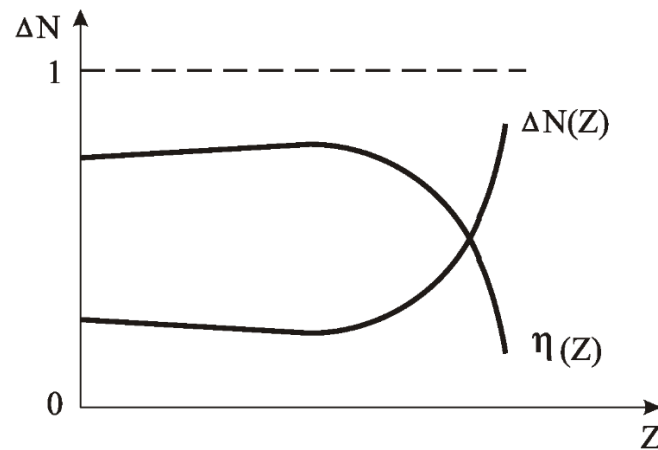


Рис.1. Характеристика відносних втрат $\Delta N(Z)$ і ККД вітротурбіни

Залежність ККД для вторинних вітротурбін може бути визначена з виразу:

$$\eta_i(Z_{2,i}) = 1 - \Delta N(Z_{2,i}). \quad (10)$$

Вона має вигляд, що представлений на рисунку 1 і може бути апроксимована виразом:

$$\eta_i(Z_{2,i}) = \eta_{nom} \cdot \left(1 - \left(\frac{Z_{2,i}}{Z_{2,i}^{xx}} \right)^a \right), \quad (11)$$

де η_{nom} – номінальне ККД вторинної вітротурбіни;

$Z_{2,i}^{xx}$ – швидкохідність холостого ходу i -ї вторинної вітротурбіни;

a – коефіцієнт апроксимації.

Потрібно відзначити, що в роботі [4] вказується, що проектування конструкції вторинних вітротурбін має бути здійснене не за критерієм максимального відбору потужності (як для звичайних ВЕУ), а за критерієм максимального ККД (не плутати з коефіцієнтом перетворення потужності C_p).

ККД є відношення коефіцієнта потужності C_p до коефіцієнта гальмування C_t :

$$\eta_{2,i} = \frac{C_{p2}}{C_{t2}} . \quad (12)$$

Причому, як вже було сказано, важливе не стільки велике значення C_p , скільки саме мале значення C_t . За цієї умови досягається максимальний коефіцієнт перетворення всієї системи аеродинамічного мультиплікування. Про це також вказується в роботі [5].

Механічна потужність для виразу (8) визначається з виразу:

$$P_{2,i} = \omega_{2,i} \cdot M_{WT2,i}, \quad (13)$$

де $\omega_{2,i}$ – кутова швидкість i -ї вторинної вітротурбіни;

$M_{WT2,i}$ – момент на валу i -ї вторинної вітротурбіни.

Для опису кутової характеристики вторинної аеромеханічної підсистеми введемо ряд позначень (рис. 2):

α_{yi} – кут встановлення вісі WT2. i щодо площини вторинної вітротурбіни;

β_i – кут між напрямом результуючого повітряного потоку та площиною обертання первинної вітротурбіни. Цей кут визначається наступним чином:

$$\beta_i = \arctg \frac{V_{1,i}}{V_{2,i}}, \quad (14)$$

$V_{1,i}$ – швидкість первинного вітрового потоку для i -ї вторинної вітротурбіни;

$V_{2,i}$ – швидкість вторинного повітряного потоку для i -ї вторинної вітротурбіни;

γ_i – кут відхилення вектору результуючого вторинного повітряного потоку від вісі вторинної вітротурбіни:

$$\gamma_i = \beta_i - \alpha_{yi} . \quad (15)$$

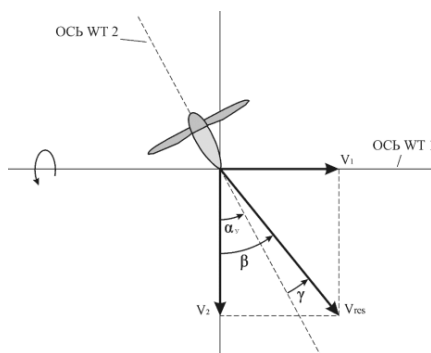


Рис. 2. Кутові параметри вторинної аеромеханічної підсистеми

Вторинний повітряний потік виникає внаслідок обертання первинної вітротурбіни на рівні радіусу закріплення вторинної вітротурбіни $R_{z,i}$:

$$V_{2,i} = R_{z,i} \cdot \omega_{1,0} \quad (16)$$

Первинний повітряний потік має різні значення для різної висоти. Тому він є функцією від кута повороту лопаті первинної вітротурбіни ν .

Нульовому значенню відповідає горизонтальне положення лопаті, коли гондола вторинної вітротурбіни знаходиться на висоті осі первинної вітротурбіни (рис. 3).

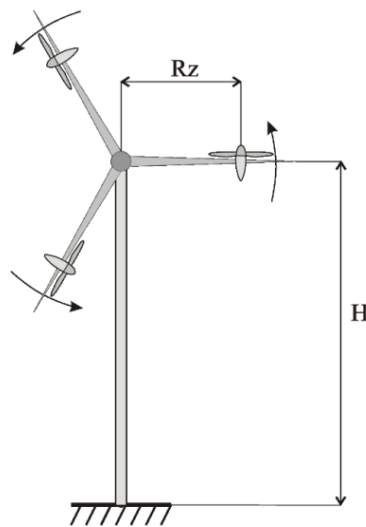


Рис. 3. Загальний вид ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням

Швидкість вітру залежить від висоти над поверхнею землі – h , і може бути визначена за допомогою наступного виразу [6]:

$$V_{1,i} = V_{1,0} \cdot \left(\frac{h}{H} \right)^{b_h} \quad (17)$$

де b_h – емпіричний параметр для певної місцевості.

Залежність (17) може бути представлена як функція часу:

$$V_{1,i}(t) = V_{1,0} \cdot \left[\frac{H + R_{z,i} \cdot \sin(\nu_i(t))}{H} \right]^{b_h} \quad (18)$$

Кут повороту визначається як інтеграл по кутовій швидкості первинної вітротурбіни:

$$\nu_i(t) = \int_0^t \omega_{1,0}(\tau) d\tau + \nu_i(0) \quad (19)$$

де $\nu_i(0)$ – кут початкового положення i -ї вторинної вітротурбіни.

З урахуванням (19) може бути отримано остаточний вираз для функції зміни швидкості вітрового потоку в залежності від положення лопаті:

$$V_{1,i}(t) = V_{1,0} \cdot \left[1 + \frac{R_{z,i}}{H} \cdot \sin \left(\int_0^t \omega_{1,0}(\tau) d\tau + \nu_i(0) \right) \right]^{b_h}. \quad (20)$$

Результуючий вторинний повітряний потік для виразу (7) може бути визначено з урахуванням (14):

$$V_{res,i} = \frac{V_{1,i}}{\sin \beta_i} = \frac{V_{2,i}}{\cos \beta_i}, \quad (21)$$

Головне рівняння руху для вторинної аеромеханічної підсистеми:

$$J_{2,i} \cdot \frac{d\omega_{2,i}}{dt} = M_{WT2,i} - M_{g,i}, \quad (22)$$

де $J_{2,i}$ – момент інерції вторинної підсистеми;

$M_{WT2,i}$ – момент на валу i -ї вторинної вітротурбіни;

$M_{g,i}$ – електромагнітний момент i -го генератора;

Механічна характеристика вторинної вітротурбіни описується виразом аналогічним (3) з урахуванням γ :

$$M_{WT2,i} = \frac{\rho \cdot S_{WT2,i} \cdot V_{res,i}^3 \cdot C_{p2,i}}{2 \cdot \omega_{2,i}} \cdot \cos \gamma_i, \quad (23)$$

На рис.4 зображена блок-схема електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням, що побудована на базі вищезазначеного математичного опису.

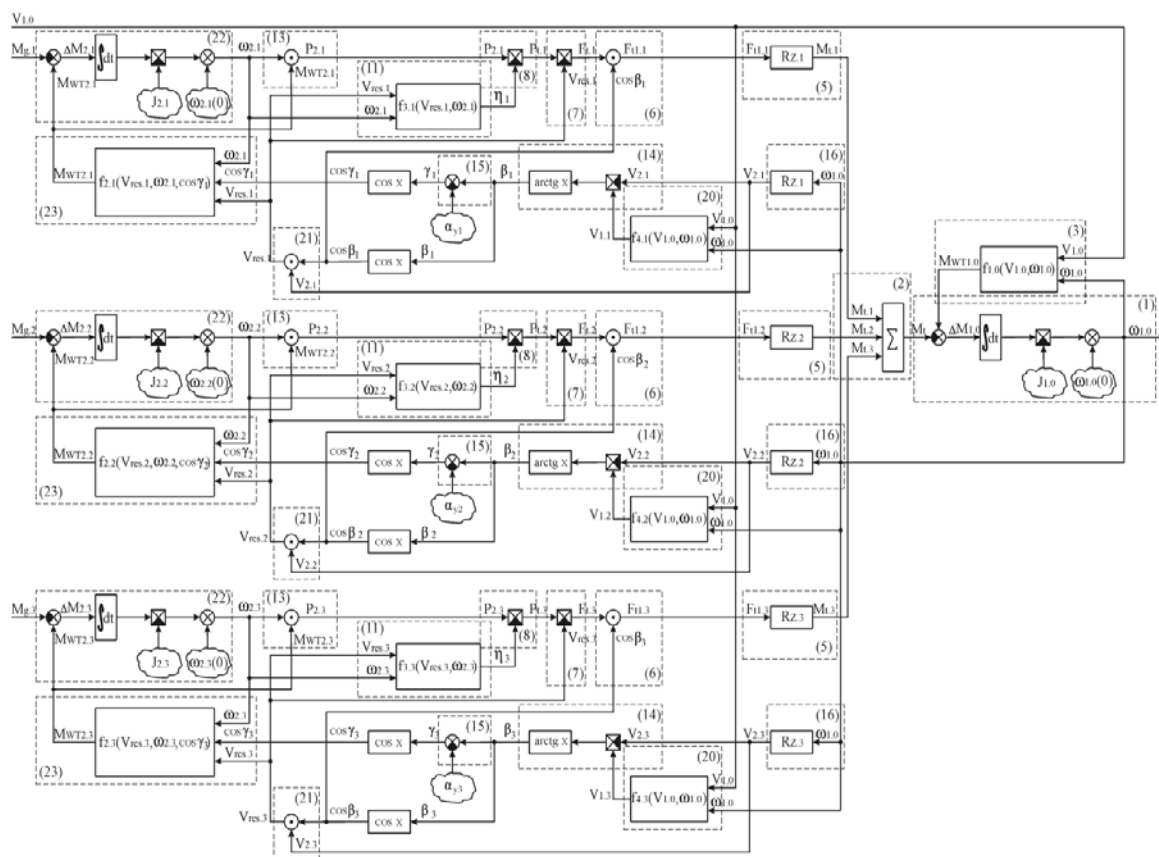


Рис. 4. Блок-схема візуальної моделі електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням

Робота моделі проілюстрована на рис.5. На ньому наведена часова характеристика потужності на валу однієї з вторинних вітротурбін, при стабільному потоці вітру. Пульсації потужності на виході обумовлені нерівномірним розподілом швидкості вітрового потоку по висоті і чутливістю вторинної аеромеханічної підсистеми внаслідок наявності кута повороту α_y .

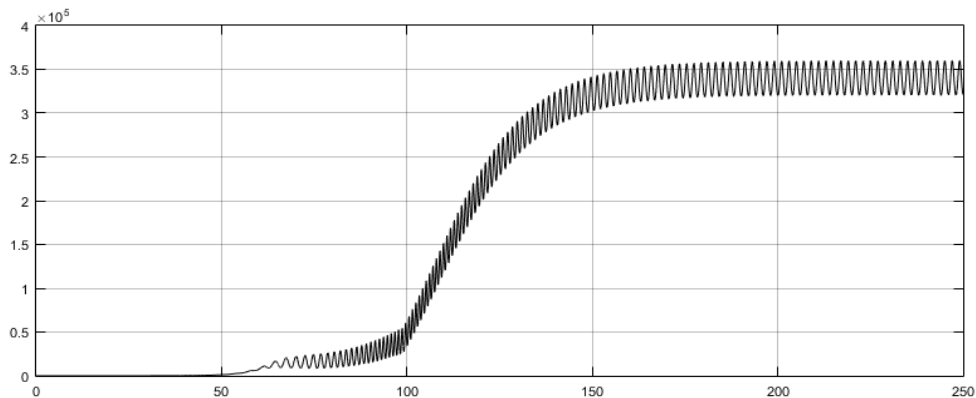


Рис.5. Часова характеристика потужності на валу вторинної вітротурбіни

Висновки. Розроблена візуальна математична модель є частиною повної математичної моделі ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням. Вона описує аеромеханічну підсистему ВЕУ. Повна модель даної ВЕУ, як об'єкта управління, включає в себе також моделі генераторів і перетворювачів частоти.

Працездатність запропонованої математичної моделі підтверджується в ході її реалізації на персональному комп'ютері, результати якої збігаються з фізичними уявленнями про властивості даної системи та розрахунками встановленого режиму.

Дана математична модель може бути використана для процедури синтезу оптимального регулятора електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням.

Література

1. Голубенко Н. С. Моделирование электромеханической системы ВЭУ с аэродинамической мультипликацией в режиме стабилизации скорости ветровых турбин / Н. С. Голубенко, Д. Г. Алексеевский, П. Д. Андриенко, И.Ю. Немудрый // Электротехника и электроэнергетика. – 2011. – № 1. – С. 13–20.
2. Алексеевский Д. Г. Динамика ветроэлектрической установки с аэродинамической мультипликацией / Д. Г. Алексеевский, В. П. Метельский, И. Ю. Немудрый // Электротехника та комп'ютерні системи. – 2011. – №3 (79), – С. 253 – 254.
3. Кривцов В. С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет "Харьковский авиационный институт", Севастополь: Севастопольский национальный технический университет, 2003. – 400 с.
4. Голубенко Н. С. Аэродинамические особенности безмультипликаторной турбогенераторной схемы ветроэлектрической установки большой мощности // Материалы IV международной конференции "Нетрадиционная энергетика в XXI веке". – Крым, Гурзуф, – 2003. – С.125–132.
5. Jamieson P. Innovation in Wind Turbine Design. John Wiley & Sons, Ltd. 2011. – 299 p.
6. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. / Твайделл Дж., Уэйр А. – М.: Энергоатомиздат. 1990. – 392 с.

References

1. Golubenko, N. S., Alekseevskiy, D. G., Andriyenko, P. D., Nemudry, I. Yu. (2011). Modelirovanie elektromekhanicheskoy sistemy vetroenergeticheskoy ustanovki s aerodinamicheskim multiplikatorom v rezhyme stabilizatsii skorosti vetrovykh turbin [Modeling of electromechanical system of wind power station with aerodynamic multiplier in the mode of wind turbines speed stabilization]. *El.tekhnika i el.energetika*, (1), 13-20.
2. Alekseevskiy, D. G., Metelsky, V. P., Nemudry, I. Yu. (2011). Dinamika vetroelektricheskoy ustanovki s aerodinamicheskoy multiplikatsiyey [Dynamics of a wind power plant with aerodynamic multiplication]. *Yelektrotekhnika ta komp'yuterni sistemi*, 3(79), 253-254.
3. Krivtsov, V. S., Oleynikov, A. M., Yakovlev, A. I. Neischerpaemaya energiya. Kn. 1. Vetroelektrogeneratory [Inexhaustible energy. Book. 1. Wind power generators] – Uchebnik. – Harkov: Natsionalnyy aerokosmicheskyy universitet "Harkovskyy aviatsionnyy institut", Sevastopol: Sevastopolskiy natsionalnyy tehnicheskiy universitet, 2003. – 400.
4. Golubenko N. S. Aerodinamicheskie osobennosti bezmultiplikatornoy turbogeneratornoy shemy vetroelektricheskoy ustanovki bolshoy moschnosti [Aerodynamic features of a multiplatform turbo generator circuit of a large-capacity wind power plant] // *Materialyi IV mezhdunarodnoy konferentsii "Netraditsionnaya energetika v XXI veke"*. – Kryim, Gurzuf, – 2003., 125–132.
5. Jamieson P. Innovation in Wind Turbine Design. John Wiley & Sons, Ltd. 2011. – 299 p.
6. John W. Twidell. Vozobnovlyaemye istochniki energii [Renewable energy resources] – M.: Energoatomizdat. 1990. – 392p.

ALEKSEEVSKIY DMYTRIY

lasian2017@ukr.net
ORCID: 0000-0002-5787-6092
Researcher ID: S-9538-2018
Docent of Chair of Electronic Systems
Zaporozhe State Engineering Academy

MANAEV KIRILL

Kirill.Manaev@outlook.com
ORCID: 0000-0002-9751-4096
Researcher ID: S-8065-2018
Zaporozhe State Engineering Academy

SHMALIY SERGEY

shsl@linet.zp.ua
ORCID: 0000-0001-6399-0310
Researcher S-8528-2018
Docent of Chair of Electronic Systems
Zaporozhe State Engineering Academy

PANKOVA OLGA

bloxa2007@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5628-7341
Researcher ID: S-7294-2018
Zaporozhe State Engineering Academy

TARANETS ANDRII

awtar@i.ua
ORCID: 0000-0003-4141-2215
Researcher S-8666-2018
Zaporozhe State Engineering Academy

**ВИЗУАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ
МУЛЬТИПЛИЦИРОВАНИЕМ**

**АЛЕКСЕЕВСКИЙ Д. Г., МАНАЕВ К. В., ПАНКОВА О. О.,
ТАРАНЕЦ А. В., ШМАЛИЙ С. Л.**

Запорожская государственная инженерная академия

Цель. Построение визуальной математической модели электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием.

Методика. В процессе построения математической модели электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием была использована методика визуального моделирования. Проверка на работоспособность математической модели была проведена в среде разработки MATLAB Simulink.

Результаты. Разработана визуальная математическая модель электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием, которая в явном виде включает в себя потери механической мощности на валу первичной ветротурбины.

Научная новизна. Математическое описание электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием с учетом потерь механической мощности на валу первичной ветротурбины при неравномерном распределении потоков мощности между тремя вторичными аэромеханическими подсистемами предложено впервые.

Практическая значимость. Разработанная визуальная математическая модель может быть использована при синтезе систем управления электромеханической системой ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием.

Ключевые слова: аэродинамическое мультиплицирование, ветроэнергетическая установка, ветротурбина, математическая модель, механические потери мощности.

**VISUAL MATHEMATICAL MODEL OF THE ELECTROMECHANIC SYSTEM OF
WIND POWER PLANT WITH AERODYNAMIC MULTIPLICATION**

**ALEKSEEVSKIY D. G., MANAEV K. V., PANKOVA O. O.,
TARANETS A. V., SHMALIY S. L.**

Zaporozhe State Engineering Academy

Purpose. *Building a visual mathematical model of the electromechanical wind power system with aerodynamic multiplication.*

Methodology. *In the process of constructing a visual mathematical model of the electromechanical system of wind turbines with aerodynamic multiplication, a mathematical apparatus for describing the system in local mean values of variables was used. Verification of the mathematical model was carried out in the MATLAB Simulink program.*

Finding. *A visual mathematical model of the electromechanical system of wind turbines with aerodynamic multiplication is developed, which includes mechanical power losses on the shaft of the primary wind turbine.*

Originality. *The visual mathematical model of the electromechanical system of wind power plant with aerodynamic multiplication taking into account the mechanical power losses on the shaft of the primary wind turbine with uneven distribution of power flows between the three secondary aeromechanical subsystems was proposed for the first time.*

Practical value. *The developed visual mathematical model is supposed to be used in future to build a complete mathematical model of wind power plant with aerodynamic multiplication and its subsequent application as a design tool.*

Keywords: *aerodynamic multiplication, wind power plant, wind turbine, mathematical model, mechanical power losses.*

УДК 621.314.26

ШАВЬОЛКІН О. О.

Київський національний університет технологій та дизайну

УДОСКОНАЛЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ СОНЯЧНОЮ БАТАРЕЄЮ

Мета. Удосконалення перетворювального агрегату системи електроживлення з фотоелектричною сонячною батареєю шляхом зменшення втрат енергії та виключення перехідних складових струму за зміною режиму роботи.

Методика. Синтез структури системи керування перетворювача на базі аналізу процесів у електричних колах з урахуванням зміни напруги, втрат енергії в напівпровідникових ключах та з використанням комп'ютерного моделювання.

Результати. Обґрунтовано можливість зменшення втрат енергії в ключах перетворювального агрегату і покращення гармонійного складу вихідного струму мережевого інвертора; розроблено структуру системи керування перетворювача з регулюванням напруги на вході мережевого інвертора та перемиканням з роботи паралельно з мережею в автономний режим і навпаки; розроблено комп'ютерну модель системи: «перетворювальний агрегат з сонячною батареєю, мережа і навантаження» з блоком визначення втрат енергії в ключах схеми.

Наукова новизна. Удосконалено: структуру системи керування перетворювального агрегату з регулюванням напруги у ланці постійного струму; структуру генератора з суміщенням функції фазового автопідстроювання частоти. Отримано залежність значення напруги на вході мережевого інвертора відповідно напрузі мережі за умови підтримання якості струму в точці підключення до мережі.

Практична значимість. Отримані рішення є основою для проектування перетворювачів комбінованих систем електроживлення з поновлювальними джерелами електроенергії.

Ключові слова: мережевий інвертор, втрати енергії в ключах, регулятор струму, регулятор напруги, фазове автопідстроювання частоти, моделювання.

Вступ. Останнім часом широкого розповсюдження набувають рішення щодо перетворювальних агрегатів (ПА) з поновлювальними джерелами електроенергії, які працюють паралельно з централізованою мережею змінного струму (ЦМ). Це стосується генерувальних установок та комбінованих систем електроживлення (КСЕ) локальних об'єктів (котедж, міні-готель, мале підприємство і тощо). Найбільш розповсюдженим рішенням є використання фотоелектричної сонячної батареї (СБ). Підвищення ефективності ПА для КСЕ за цілодобовим його використанням в роботах [1-6] пов'язують з суміщенням мережевим автономним інвертором напруги (АІН) функції силового активного фільтра (САФ) для підтримання в точці підключення до ЦМ близького до одиниці коефіцієнту потужності. За цього з урахуванням нелінійного навантаження локального об'єкту мережевий АІН використовується як джерело несинусоїдального струму.

Постановка задачі. Специфікою вітчизняних перевантажених, зношених ЦМ є значні відхилення значень напруги, що перевищують припустимі стандартами значення. Особливо це стосується локальних об'єктів за значного віддалення їх від трансформаторних підстанцій. Мережеві АІН, наприклад, типу PVI -5000 (фірма АВВ) припускають можливість використання за напруги 180÷264 В (220±20%) [7]. За постійної потужності у разі зменшення напруги ЦМ зростає струм і, відповідно, зростають втрати енергії в ключах, що потребує зменшення потужності, що передається (генерується), або завищення потужності ПА. Мож-

ливість використання ПА за підвищеної напруги ЦМ передбачає відповідне завищення постійної напруги на вході АІН і призводить до збільшення втрат енергії перемикачів в ключах. В роботі [5] для мереж зі значним відхиленням напруги для КСЕ запропоновано регулювання напруги на вході мережевого АІН, що сприятиме зменшенню втрат енергії в його ключах. Також у разі відключення мережі або виходу значення напруги ЦМ за припустимі межі за наявності генерації СБ пропонується перемикати ПА у автономний режим роботи. Але відсутні кількісні показники і залежності для регулювання, не враховано змінювання втрат енергії в ключах імпульсного перетворювача напруги (ІПН) на вході АІН, не оцінено вплив на якість струму. Також декларується можливість перемикачів ПА з паралельної роботи з мережею в автономний режим і зворотнє підключення до ЦМ з використанням в системі керування автономного генератора з частотою мережі, проте не розглядається питання синхронізації перемикачів, що може спричинити перехідні викиди струму в колах. Отже ефективність застосування ПА у цих умовах потребує додаткового вивчення. Існуючі методи визначення втрат енергії в ключах ПА базуються на відомій формі струму за певних принципів керування, наприклад, програма «Semisel» (фірма «Semikron») [8]. В разі суміщення АІН функції САФ, коли з урахуванням струму навантаження струм АІН має довільну форму, питання визначення втрат енергії ускладнюється. Широкі можливості для аналізу процесів в схемі інвертору дає програмний пакет «Matlab» у разі доповнення моделлю для визначення втрат енергії в ключах, яка базується на миттєвих значеннях струмів ключів і каталожних даних обраних приладів.

Отже, питання удосконалення ПА, що працює паралельно з ЦМ, передбачає додаткове вивчення стосовно наступного:

- дослідити можливості зменшення втрат енергії в ключах ПА в умовах змінювання напруги ЦМ при регулюванні напруги у ланці постійного струму;
- розробити структуру системи керування ПА з регулюванням напруги ІПН згідно напрузі мережі та з синхронізацією перемикачів режимів роботи;
- розробити математичну модель ПА на ПК з визначенням втрат енергії у ключах і здійснити віртуальний експеримент.

Результати досліджень. Структура силових кіл однофазної системи «ПА з СБ – ЦМ – навантаження» (рис.1) містить мережевий АІН на ключах $K1 \div K4$, що через реактор $L2$ і фільтр $R_f C_f$ підключено до ЦМ (G), навантаження (H), підвищувальний ІПН (ключ $K5$, діод $VD5$, реактор $L1$) на виході СБ. Для вимірювання використано датчики напруги ДН і струму ДС. Підключення АІН, навантаження і СБ здійснюється через автоматичні вимикачі QF . Відключення ПА від ЦМ здійснюється контактором K .

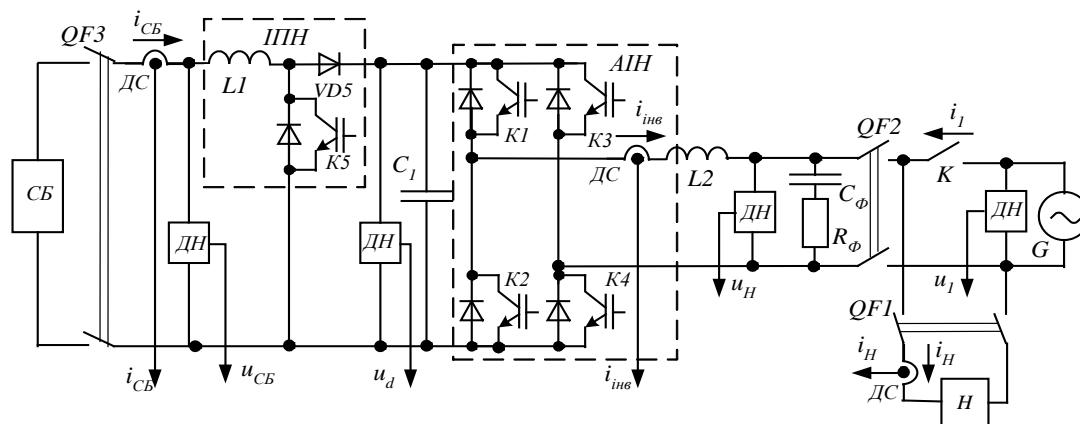


Рис. 1. Структура силових кіл ПА КСЕ

Індуктивність реактора $L2$ на виході мережевого АІН L можна визначити виходячи з відносного значення падіння напруги (за 1-ю гармонікою) для максимального значення $I_{інвMAX}$ струму АІН $b = \frac{U_L}{U_{1НОМ}} = \frac{\omega L \cdot I_{інвMAX}}{U_{1НОМ}}$ (де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота напруги ЦМ U_1 , $f=50$ Гц – частота напруги, $U_{1НОМ}$ – номінальна напруга). Із змінюванням напруги U_1 маємо $b' = b / U * (U^* = U_1 / U_{1НОМ})$.

Для забезпечення можливості відпрацювання заданого синусоїдального струму $i_{ЗAD}$ швидкість зміни струму АІН $i_{інв}$ повинна перевищувати максимальне значення $di_{ЗAD}/dt = \omega I_{інвMAXm}$. При цьому напруга U_L для випадку, коли напруга мережі дорівнює амплітуді $U_L = U_d - U_{1m} = L\omega I_{інвMAXm}$ (напруга на вході АІН $U_d = aU_{1m}$). Звідси

$$a \geq 1 + \frac{L \cdot \omega \cdot I_{інвMAXm}}{U_{1m}} = 1 + b. \quad (1)$$

У разі суміщення АІН функції САФ другу складову (1) слід, як мінімум, подвоїти [4]. Тоді $a = 1 + 2b'$. Отже, регулювання напруги на вході АІН слід здійснювати згідно залежності

$$U_d = aU_{1m} = U_{1m}(1 + 2b'). \quad (2)$$

У разі використання в ПА підвищувального ПН можливості регулювання напруги обмежуються відповідно максимальному значенню напруги СБ $U_{дМІН} \geq U_{СБMAX}$.

Розглянемо використання методу формування миттєвого значення струму АІН $i_{інв}$ за його відхиленням $\Delta i = (i_{інвЗAD} - i_{інв})$ при постійній частоті перемикання ключів АІН. Відомі різні принципи реалізації контуру струму [2-5]:

а) коли Δi подається до пропорційно-інтегрального (ПІ) або іншого регулятора [2,3], що формує напругу на вході блока ШІМ модуляції, якій відповідає задане значення струму;

б) коли Δi подається до блоку ШІМ модуляції безпосередньо, а модулююча напруга формується за певним законом [4].

За цього струм АІН змінюється за лінійним законом і пульсує відносно заданого значення. Амплітуда пульсацій струму змінюється з частотою кратною частоті вихідної напруги і має місце похибка відпрацьовування струму, значення якої визначається реалізацією контуру струму. При використанні уніполярної ШІМ частота модуляції вихідної напруги АІН [4]

$$f_M \geq \frac{a\omega}{8bc}, \text{ або } f_M \geq \frac{a'\omega}{8b'c'}, \quad (3)$$

де $c = \frac{\Delta I_m}{I_{инв MAXm}}$ відносне значення амплітуди пульсацій до амплітуди $I_{инв MAX}$.

За однакової частоти модуляції згідно (3) отримуємо $\frac{a}{bc} = \frac{a'}{b'c'}$, звідки

$$c' = \frac{a'bc}{b'a}. \quad (4)$$

Так, якщо прийняти $b=0.15$, $a=1.3$ (для $U^*=1$), а напругу U_d на вході мережевого АІН обрати згідно максимальній напрузі мережі U_{IMAX} , наприклад, $U_{IMAX}=264$ В, тоді $U^*=1.2$, $a'=1.25$, $b'=0.125$, $U_d=466.6$ В, відповідно, значення $c' = 1.154c$, тобто амплітуда пульсацій струму зростає. За того ж значення $U_d=466.6$ В і $U^*=0.8$ отримуємо $a'=1.87$, $c' = 1.148c$.

У разі регулювання напруги U_d і $U^*=0.8$ маємо $b'=0.1875$, $a'=1.375$, $U_d=343.2$ В, відповідно, $c' = 0.846c$. Отже, із зменшенням напруги U_d амплітуда пульсацій струму зменшується, що сприятиме покращенню гармонійного складу струму АІН і, відповідно, струму ЦМ.

Попередній розрахунок для оцінки можливостей зменшення втрат енергії в ключах ПА виконаємо за умови, що струм АІН є синусоїдальним при одиничному коефіцієнті потужності і змінюванні $U_I = 176 \div 264$ В за постійної частоти модуляції, що відповідає використанню ПА як генерувального, без функції САФ, для:

- варіанту 1 – з напругою $U_d = const$, значення якої за умови забезпечення роботи однофазного мостового мережевого АІН у разі U_{IMAX} становить $U_d = aU_{ImMAX} = 466.6$ В, коефіцієнт модуляції за амплітудою $\mu = U_{Im} / U_d$ змінюється згідно U_I ;

- варіанту 2 – з регулюванням U_d згідно (2) в межах $U_d = 343 \div 466.6$ В.

Приймаємо вихідний струм мережевого АІН $I_{НОМ} = 25$ А (амплітуда $I_{НОМm} = 35.35$ А), що при одиничному коефіцієнті потужності $\cos\varphi = 1$ та $U_I = 220$ В відповідає вихідній потужності ПА $P = 5.5$ кВт. Вважаємо потужність, що передається АІН, постійною. Розглянемо використання в схемі АІН IGBT модуля (однофазний міст) типа SK 50GH12T4T [9] (фірма Semikron). Частота модуляції АІН 20 кГц.

Втрати провідності транзистора IGBT, діода і загальні ключа [10]:

$$P_{VTCOND} = U_{CE(TO)} I_{VTCP} + I_{VT}^2 R_{CE}, \quad P_{VDCOND} = U_{FO} I_{VDCP} + I_{VD}^2 R_F.$$

Середнє і діюче значення струму IGBT за однополярної синусоїдальної ШІМ:

$$I_{VTCP} = \frac{I_{Hm}}{2\pi} \left(1 + \frac{\mu\pi}{4} \cos\varphi\right), \quad I_{VT} = \frac{I_{Hm}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2\mu}{3\pi} \cos\varphi}.$$

Середнє і діюче значення струму діода:

$$I_{VDCP} = \frac{I_{Hm}}{2\pi} \left(1 - \frac{\mu\pi}{4} \cos \varphi\right), \quad I_{VD} = \frac{I_{Hm}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{2\mu}{3\pi} \cos \varphi}.$$

Втрати перемикачів IGBT, діода:

$$P_{SW} = f \cdot E_{tot} \cdot \left(\frac{I_{CP}}{I_{CT}}\right)^{K_I} \left(\frac{U}{U_{CT}}\right)^{K_V} (1 + TC(T_J - T_{JCT})),$$

де I_{CT} , U_{CT} , T_J – стандартні значення струму, напруги і температури, для яких задані значення енергії втрат, K_I , K_V – коефіцієнти апроксимації, що визначають залежність втрат енергії від фактичних значень струму і напруги (для IGBT $K_I=1$, $K_V=1,4$, для діода $K_I=K_V=0,6$), TC – температурний коефіцієнт (для IGBT $TC=0,006$, для діода $TC=0,003$), U_d – напруга на вході АІН, f – частота перемикачів (модуляції). Середнє значення напівхвилі вихідного струму за синусоїдальної форми $I_{CP} = \frac{I_{Hm}}{\pi}$. Для спрощення температуру T_J не враховуємо. З урахуванням цього одержуємо:

$$P_{VTSW} = f \cdot E_{tot} \cdot \left(\frac{I_{CP}}{I_{CT}}\right) \left(\frac{U}{U_{CT}}\right)^{1,4}, \quad P_{VDSW} = f \cdot E_{tot} \cdot \left(\frac{I_{CP}}{I_{CT}}\right)^{0,6} \left(\frac{U}{U_{CT}}\right)^{0,6}.$$

Втрати в ПІН. Для ПІН використано модуль типу SK 35 GAL 12T4 [9]. Приймаємо частоту модуляції 10 кГц. Щодо визначення струму ключів ПІН для спрощення вважаємо, що струм який споживається від СБ $I_{CB}=I_d/(1-\gamma)$ ідеально згладжений (де γ – коефіцієнт заповнення імпульсів). За цього струм транзистора і діода мають практично прямокутну форму. Відповідно середні і діючі значення струму транзистора і діода:

$$I_{VTCP} = I_{CB}\gamma, \quad I_{VDCP} = I_{CB}(1-\gamma), \quad I_{VT} = I_{CB}\sqrt{\gamma}, \quad I_{VD} = I_{CB}\sqrt{1-\gamma}, \quad \gamma = 1 - U_{CB}/U_d.$$

Якщо прийняти за номінальне значення загальні втрати потужності при $U_d=466.6$ В і $U_I=220$ В ($P^*=1$), то за постійної напруги $U_d=466.6$ В і $U_I=264$ В втрати (відносне значення) становлять 0.87, за напруги $U_I=176$ В втрати становлять 1.195 (зростають на 19.5%). У той же час, у варіанті з регулюванням напруги U_d згідно (2) за $U_I=220$ В загальні втрати 0.904, за $U_I=176$ В загальні втрати 0.98. Для порівняння, у разі зменшення частоти модуляції до 15 кГц при $U_d=466.6$ В і $U_I=176$ В загальні втрати 1.047 і лише у разі зменшення частоти до 10 кГц (вдвічі) – 0.899. За одночасного регулювання напруги і зменшення частоти до 10 кГц при $U_I=176$ В загальні втрати 0.76. Проте зменшення частоти модуляції не завжди можливо за умов забезпечення якості струму мережі, особливо це стосується ПА з суміщенням функцій САФ. Запропонована структура системи керування ПА (рис.2) містить два канали: керування АІН і ПІН. Мережевий АІН використовується як ведений мережею у режимі джерела струму і суміщає функцію САФ. Система керування двоконтурна. Внутрішній контур струму містить регулятор струму з розподільвачем імпульсів керування (РС) і блок завдання струму (БЗС). Зовнішнім контуром є контур регулювання напруги. У разі роботи ПА паралельно з мережею (перемикачі S1 та S2 – у положенні 1) використовується контур регулювання напруги на вході АІН U_d з пропорційно-інтегральним (ПІ) регулятором напруги РН1, що визначає амплітуду струму мережі I_{Im} , за якої напруга постійна і відповідає заданому значенню $U_{dзад}$. БЗС здійснює формування завдання миттєвого значення струму АІН i_{inv} згідно заданому значенню струму ЦМ $i_I=I_{Im}\sin\omega t$ та струму навантаження i_H . За цього задане значення

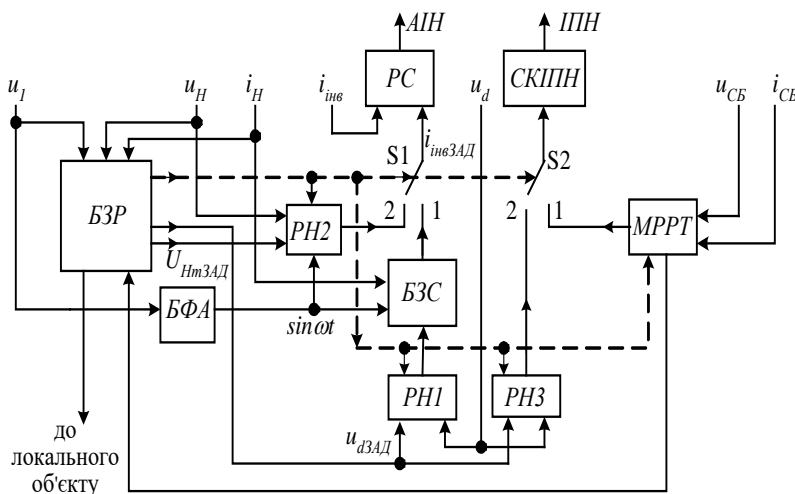


Рис. 2. Структурна схема системи керування ПА

$i_{инвЗАД} = i_1 - i_H$. Функція $\sin \omega t$ визначається блоком фазового автопідстроювання (БФА) згідно напрузі ЦМ u_1 . Значення $U_{дЗАД}$ визначається функціональним перетворювачем у блоці завдання режиму (БЗР) згідно значенню напруги мережі. БЗР також здійснює керування процесами перемикання ПА при зміні режиму його роботи. Завдання вхідного струму ПІН визначає контролер максимальної потужності СБ (MPPT), що забезпечує відбір максимальної потужності за поточних умов, відповідне значення потужності $P_{СБ}$ подається до БЗР. Блок БЗР також визначає поточне значення потужності навантаження P_H . У разі виникнення або виходу напруги мережі за припустимі межі за сигналом БЗР контактор K відключає ПА від ЦМ, S1 та S2 перемикаються у положення 2. За цього ПА переходить у автономний режим роботи і «оповіщає» про це локальний об'єкт. Якщо поточне значення $P_{СБ}$ перевищує P_H і є достатнім для нормального функціонування об'єкту задається номінальне значення напруги навантаження $u_H = U_{Hm} \sin \omega t$, яке надходить на вхід ПІ регулятора напруги РН2. За цього РН2 визначає завдання струму АІН. ПІ регулятор напруги РН3 визначає завдання струму ПІН, за якого напруга на вході АІН є постійною, а потужність, що відбирається від СБ відповідає потужності навантаження. У разі, коли потужності СБ та навантаження на момент перемикання є близькими, БЗР зменшує завдання $U_{HmЗАД}$ на $5 \div 7\%$, що є припустимим і, відповідно, зменшує потужність навантаження на $10 \div 15\%$. Якщо потужність СБ є недостатньою, здійснюється відключення частки споживачів локального об'єкту. Регулятори напруги, що в поточному режимі не використовуюються «обнуляються» за сигналом БЗР, чим забезпечуються нульові початкові умови при їх вмиканні до роботи.

Певні особливості має БФА (рис.3), який у автономному режимі працює як автономний генератор синусоїдальної напруги із значенням частоти близьким до 50 Гц, а у разі відновлення напруги мережі формує напругу, що співпадає за фазою з першою гармонікою напруги мережі. Його структура містить фазовий детектор (ФД), підсумкові пристрої ПП1 та ПП2, інтегратори з входом скидання I1 та I2, генератор синусоїдальної функції \sin (задається у табличному вигляді), компаратори К1 та К2, фільтр низької частоти (ФНЧ), ПІ - регулятор.

У автономному режимі канал фазового детектора не працює, значення $\Delta\omega = 0$ і згідно заданому значенню кутової частоти ω_0 формується відповідна синусоїдальна функція. За на-

явності напруги мережі вмикається канал фазового автопідстроювання. На виході ФД формуються дві послідовності імпульсів, тривалість яких відповідає зсуву за фазою напруги мережі і генератора синусоїдальної функції. Імпульси, полярність яких відповідає знаку кута зсуву (відстає або випереджає) подаються на І2. Вихідна напруга І2 є пропорційною куту зсуву і після ФНЧ надходить до ПП2, на другий вхід якого подається задане значення кута зсуву (зазвичай $\varphi=0$ або інше значення, якщо ПА використовується в якості генератора реактивної потужності). Відхилення кута з ПП2 подається на ІІ регулятор, що змінює кутову частоту генератора синусоїдальної функції забезпечуючи співпадіння синусоїдальної функції з напругою мережі за фазою та частотою. Вмикання контактору К у разі відновлення напруги ЦМ здійснюється з затримкою у декілька хвилин, щоб виключити зайві перемикання ПА у разі пробних перемикань апаратів розподільчої мережі.

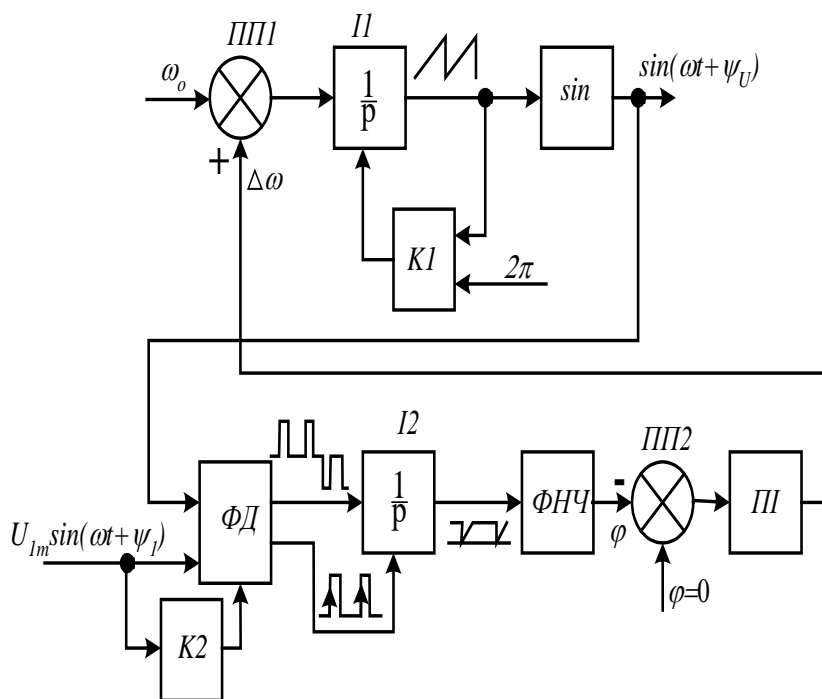


Рис. 3. Структура блока БФА

Результати моделювання. Для імітаційного моделювання використовувався програмний пакет Matlab. Моделювання здійснено згідно структур на рис.1, рис.2, рис.3 у разі відсутності навантаження (генерувальний ПА з синусоїдальним струмом) та за нелінійного навантаження (випрямляч з вихідним ємнісним фільтром і RL навантаження з $\cos\varphi=0.8$) з суміщенням функції САФ. Модель ЦМ (220 В) містить опір мережі $R=0.02$ Ом, $X_L=0.02$ Ом, параметри фільтра на вході $R_\varphi=0.3$ Ом, $C=60$ мкФ. СБ має напругу 300 В. Для визначення втрат енергії в ключах ПА загальна модель доповнена обчислювальним блоком. За цього використовуються каталожні дані обраних приладів та миттєві значення струмів ключів (визначаються в загальній моделі ПА). Втрати провідності визначаються як середнє за період T

вихідної частоти значення миттєвої потужності на приладі $P_c = \frac{1}{T} \int_0^T u_v i_v dt$ (u_v, i_v – миттєві значення напруги і струму). Значення u_v розраховується відповідно до вихідної вольт-амперної характеристики, яка задається в табличній формі. Втрати перемикавання визначаються відповідно до миттєвих значень струму в моменти перемикавання ключів, виходячи з залежностей $E_{on}=f(i_v)$ і $E_{off}=f(i_v)$. За синусоїдальної форми струму ПА значення втрат отримані шляхом моделювання близькі до розрахункових (розходження $\leq 3\%$).

Що стосується ПА без навантаження, регулювання напруги U_d забезпечує не лише зменшення втрат потужності у ключах, а й деяке зменшення THD струму у точці підключення до мережі. Оцінювалась робота з малим струмом ЦМ. Так при $U_l=176$ В і $U_d=466$ В за амплітуди 1-ї гармоніки струму $I_{m(1)}=2.65$ А значення THD=2%, у разі $U_d=343$ В та $I_{m(1)}=2.65$ А, THD=1.5%.

У разі суміщення ПА функції САФ (за того ж значення потужності) щодо втрат потужності у ключах маємо таку ж картину, що і за відсутності навантаження. Що стосується гармонійного складу струму в точці підключення ПА до мережі маємо погіршення. Це пов'язано з тим, що струм мережі визначається сумою вихідного струму ПА та навантаження. За цього при близьких значеннях 1-х гармонік струмів отримуємо в струмі мережі різницю 1-х гармонік струмів ПА та навантаження і пульсації струму. Так для $U_l=176$ В і $U_d=466$ В за амплітуди 1-ї гармоніки струму мережі $I_{m(1)}=2.65$ А його THD=4.26%, із зменшенням $U_d=343$ В за того ж струму його THD=4.27%. Отже у разі суміщення ПА функції САФ гармонійний склад струму ЦМ за регулюванням напруги практично не погіршується.

Щодо запропонованих структур керування моделювання дозволило уточнити налаштування регуляторів. На рис.4 напруга мережі u_l (з частотою 50 Гц) поряд з 1-ю гармонікою $u_{(1)}$ містить вищі гармоніки з відносним значенням амплітуди $u_{(3)}=5\%$, $u_{(5)}=6\%$, $u_{(7)}=5\%$, $u_{(11)}=3.5\%$, $u_{(13)}=3\%$ і подається у момент часу $t=0.06$ с практично у протифазі з напругою БФА $u_{БФА}$ (початкове значення частоти $\omega_0=49$ Гц). За цього час автопідстроювання не перевищує 0.5 с, що за даних умов цілком достатньо.

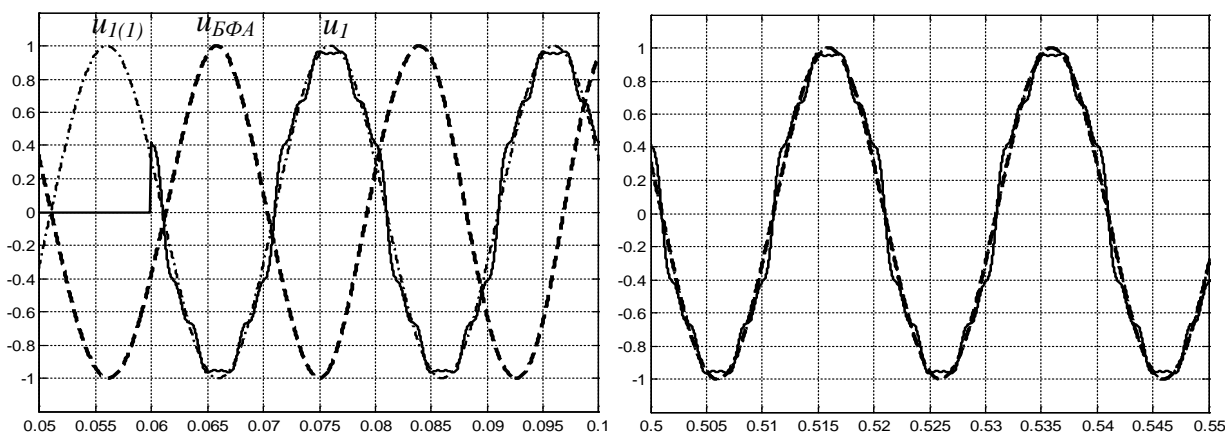


Рис. 4. Напруга БФА при підключенні ЦМ

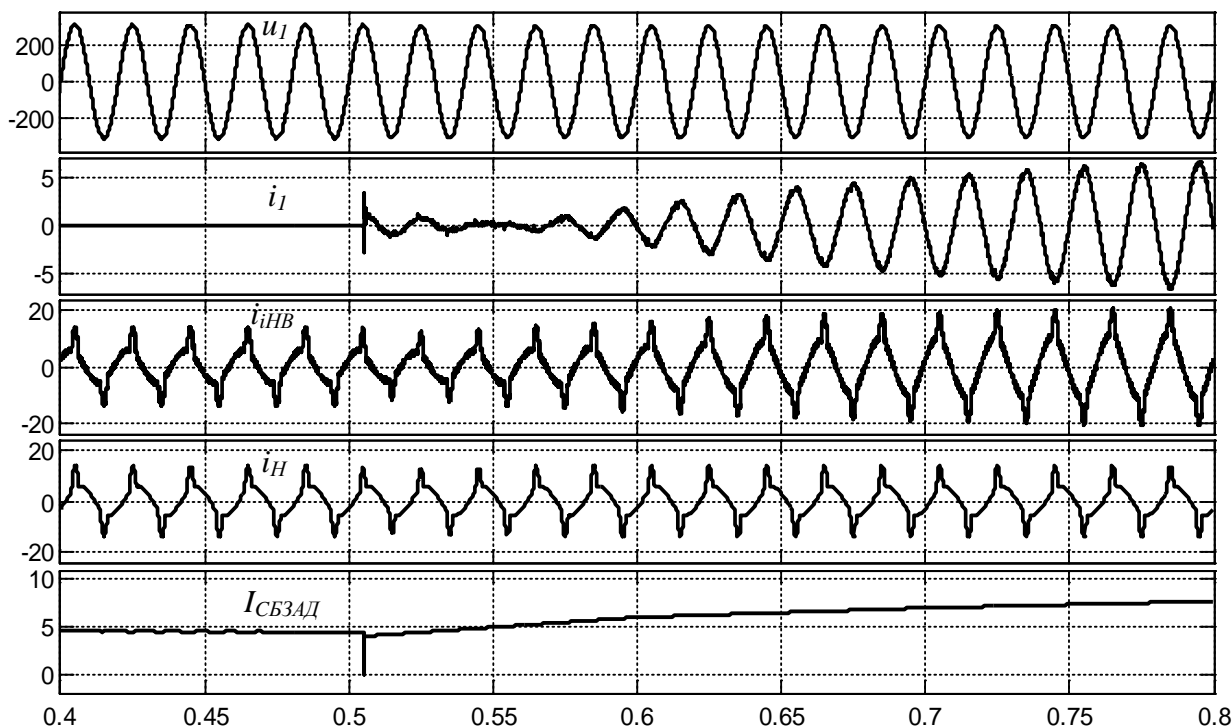


Рис. 5. Осцилограми напруги і струмів у разі перемикання ПА з автономного режиму роботи до роботи паралельно з ЦМ

На рис.5 наведені осцилограми напруги і струмів у разі перемикання ПА з автономного режиму роботи до роботи паралельно з ЦМ. Розглядається випадок, коли максимальна за даних умов потужність СБ $P_{СБМАХ} > P_H$.

Перемикання здійснюється після синхронізації системи керування з напругою мережі u_1 . У момент часу $t=0.505$ с вмикається контактор K і змінюється структура системи керування. До перемикання мав місце баланс потужності СБ і навантаження, надалі контролер МРРТ поступово збільшує струм СБ $I_{СБЗАД}$ і потужність СБ. За цього після підключення до ЦМ має місце деяке споживання енергії – струм i_1 співпадає з напругою мережі u_1 , потім фаза струму змінюється і надалі має генерація енергії у ЦМ.

Висновки. Запропонований варіант побудови структури системи керування ПА з регулюванням напруги у ланці постійного струму згідно залежності від напруги мережі дозволяє зменшити втрати енергії в ключах схеми до 20 % залежно від напруги мережі. За відсутності функції САФ це дозволяє також покращити гармонійний склад вихідного струму. Структура системи є змінною і забезпечує роботу ПА паралельно з мережею та в автономному режимі. З використанням запропонованого рішення блока фазового автопідстроювання виключаються перехідні стани та викиди струму у разі перемикання з автономного режиму роботи ПА на паралельну роботу з мережею.

Розроблена математична модель для визначення втрат потужності в ключах ПА згідно каталожним даним та миттєвим значенням струму ключів дозволяє отримувати об'єктивні дані у разі струму довільної форми. Результати моделювання системи з використанням програмного пакету Matlab підтверджують працездатність запропонованих рішень. Подальшим напрямком роботи є дослідження і зіставлення показників роботи схеми ПА для КСЕ за інших принципів формування струму та проробка можливостей узгодження роботи ПА в автономному режимі зі споживачами локального об'єкту, де останнім часом використовуються «smart» технології.

Література

1. Tsao-Tsung Ma. Power Quality Enhancement in Micro-grids Using Multifunctional DG Inverters / Tsao-Tsung Ma //Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2012 Vol II, IMECS 2012, March 14 – 16, 2012, Hong Kong. – pp.996 - 1001.
- 2 Vigneysh T. Grid interconnection of renewable energy sources using multifunctional grid-interactive converters: A fuzzy logic based approach. /T. Vigneysh, N. Kumarappan// Electric Power Systems Research 151.- 2017.- P.359–368. [http://dx. doi.org/10.1016/j.epsr.2017.06.010](http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2017.06.010)
3. Edris Pouresmaeil. A Control Technique for Integration of DG Units to the Electrical Networks / Edris Pouresmaeil, Carlos Miguel-Espinar, Miquel Massot-Campos, Daniel Montesinos-Miracle, Oriol Gomis-Bellmunt//. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 60, NO. 7, JULY 2013.- P.2881–2893. DOI 10.1109/TIE.2012.2209616.
4. Шавёлкин А. А. Структуры однофазных преобразовательных агрегатов для комбинированных систем электроснабжения с фотоэлектрическими солнечными батареями / А. А. Шавёлкин // «Технічна електродинаміка» ІЭД НАН України № 2. – 2018. - P. 39 – 46. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2018.02.039>.
5. Шавьолкін О. О. Перетворювальний агрегат з функцією стабілізації напруги для комбінованої системи електроживлення з поновлювальними джерелами електроенергії / О. О. Шавьолкін, Є. Ю. Становський, М. І. Кравченко // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика» №1(18), 2017, с. 31 – 37.
6. Siyu Gao. Phase-Locked Loops for Grid-Tied Inverters: Comparison and Testing / Siyu Gao, M. Barnes// PEMD 2016, Publisher: IET.- 6 p. DOI: 10.1049/cp.2016.0304

References

1. Tsao-Tsung Ma. Power Quality Enhancement in Micro-grids Using Multifunctional DG Inverters. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2012 Vol II, IMECS 2012, March 14 – 16, 2012, Hong Kong. – pp.996 - 1001.
- 2 Vigneysh T., Kumarappan N. Grid interconnection of renewable energy sources using multifunctional grid-interactive converters: A fuzzy logic based approach. Electric Power Systems Research 151.- 2017.- P.359–368. [http://dx. doi.org/10.1016/j.epsr.2017.06.010](http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2017.06.010)
3. Edris Pouresmaeil, Carlos Miguel-Espinar, Miquel Massot-Campos, Daniel Montesinos-Miracle, Oriol Gomis-Bellmunt. A Control Technique for Integration of DG Units to the Electrical Networks. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 60, NO. 7, JULY 2013.- P.2881–2893. DOI 10.1109/TIE.2012.2209616.
4. Shavelkin A.A. (2018) Структуры однофазных перетворювальних агрегатів для комбінованих систем електропостачання з фотоелектричними сonyачними бата-реями [Structures of single-phase converter units for combined power supply systems with photovoltaic solar batteries] «Технічна електродинаміка» ІЕД НАН України - "Technical electrodynamics" IED of NAS of Ukraine, 2, 39 – 46 [in Russian].
5. Shav'olkin O.O., Stanov's'kyu YE.YU., Kravchenko M.I. (2017) Peretvoryuval'nyy ahrehat z funktsiyeyu stabilizatsiyi napruhy dlya kombinovanoi systemy elektrozhivlennya z ponovlyuval'nymy dzherelamy elektroenerhiyi [Converter unit with function of voltage stabilization for combined power supply system with renewable energy sources]. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: «Elektrotekhnika i enerhetyka» - Scientific works of DonNTU Series: "Electrical engineering and power engineering", 1(18), 31 – 37* [in Ukrainian].
6. Siyu Gao, M. Barnes. Phase-Locked Loops for Grid-Tied Inverters: Comparison and Testing. PEMD 2016, Publisher: IET.- 6 p. DOI: 10.1049/cp.2016.0304
7. Brochure. ABB solar inverters. www.abb.com

7. Brochure. ABB solar inverters. www.abb.com/solarinverters.
8. Колпаков А. И. Программа SEMISEL — скорая помощь разработчику / А. И. Колпаков // Компоненты и технологии. 2006. № 10.
9. SEMIKR ON IGBT modules. <https://www.semikron.com/products/product-classes/igbtmodules.html>.
10. Шавьолкін О. О. Енергетична електроніка: навч. посібник / О. О. Шавьолкін.- К.: КНУТД, 2017. – 396 с.
- /solarinverters
8. Kolpakov A. I. (2006). Programma SEMISEL - skoraya pomoshch' razrabotchiku [SEMISEL program - an ambulance to the developer]. *Komponenty i tekhnologii - Components and technologies. №10*. [in Russian].
9. SEMIKRON IGBT modules. <https://www.semikron.com/products/product-classes/igbtmodules.html>.
10. Shav'olkin O. (2017) *Enerhetychna elektronika* [Power Electronics]. K.: KNUVD [in Ukrainian].

SHAVELKIN ALEXANDER

shavolkin@gmail.com

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

Researcher ID: T-2652-2018

Kiev National University of Technologies & Design

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕЕЙ ШАВЁЛКИН А. А.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Совершенствование преобразовательного агрегата системы электроснабжения с фотоэлектрической солнечной батареей путем уменьшения потерь энергии и исключения переходных составляющих тока при изменении режима работы.

Методика. Синтез структуры системы управления преобразователя на основе анализа процессов в электрических цепях с учетом изменения напряжения, потерь энергии в полупроводниковых ключах и с использованием компьютерного моделирования.

Результаты. Обоснована возможность уменьшения потерь энергии в ключах преобразовательного агрегата и улучшения гармонического состава выходного тока сетевого инвертора; разработана структура системы управления преобразователя с регулированием напряжения на входе сетевого инвертора и переключением с работы параллельно с сетью в автономный режим и наоборот; разработана компьютерная модель системы «преобразовательный агрегат с солнечной батареей, сеть и нагрузка» с блоком определения потерь энергии в ключах схемы.

Научная новизна. Усовершенствовано: структуру системы управления преобразовательного агрегата с регулированием напряжения в звене постоянного тока; структуру генератора с размещением функции фазовой автоподстройки частоты. Получено зависимость значения напряжения на входе сетевого инвертора согласно напряжению сети при условии поддержания качества тока в точке подключения к сети;

Практическая значимость. Полученные решения являются основой для проектирования преобразователей комбинированных систем электропитания с возобновляемыми источниками электроэнергии.

Ключевые слова: система электроснабжения, сетевой инвертор, силовой активный фильтр, потери энергии в ключах, регулятор тока, регулятор напряжения, фазовая автоподстройка частоты, коэффициент гармоник, моделирование.

IMPROVEMENT OF THE CONVERTER UNIT OF POWER SUPPLY SYSTEM WITH A PHOTOVOLTAIC SOLAR BATTERY

SHAVOLKIN O. O.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. *Improving of the converter unit for the power supply system with a photovoltaic solar battery by reducing power losses and eliminating transient components of the current when the operating mode changes.*

Methodology. *Synthesis of structure of the converter control system based on the analysis of processes in electrical circuits taking into account voltage changes, energy losses in semiconductor switches and using computer simulation.*

Findings. *The possibility of reducing energy losses in the keys of the converter unit and improving the harmonic composition of the output current of the grid inverter has been substantiated; the structure of the converter control system has been developed with voltage regulation at the input of the grid inverter and switching from work in parallel with the grid to the autonomous mode and vice versa; a computer model of the system “converter unit with solar battery, grid and load” with a unit for determining energy losses in keys of circuit was developed.*

Originality. *Improved: the structure of the control system of the converter unit with voltage regulation in the DC link; the structure of the generator with the combination of the function of phase-locked loop. The dependence of the voltage value at the input of the grid inverter is obtained according to the grid voltage, provided that the current quality is maintained at the grid connection point.*

Practical value. *Solutions that are obtained are the basis for the development for converters of combined power supply systems with renewable sources of electricity.*

Keywords: *power supply system, a grid inverter, power active filter, energy losses in keys, current controller, voltage controller, phase locked loop, total harmonic distortion, modeling.*

УДК 621.318

ШВЕДЧИКОВА І. О.*, РОМАНЧЕНКО Ю. А.**

*Київський національний університет технологій та дизайну

**Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛІГРАДІЄНТНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА ПРИ ЗМІНІ ФОРМИ ПЛАСТИН МАТРИЦІ

Мета. Дослідження впливу форми елементів багатокомпонентної пластинчастої матриці поліградієнтного електромагнітного сепаратора на його силові характеристики.

Методика. При проведенні аналізу розподілу магнітного поля в робочій зоні електромагнітного сепаратора використовується метод скінченних елементів, реалізований в програмному комплексі ELCUT 5.6.

Результати. Проведено чисельно-польовий аналіз розподілу магнітного поля в робочих міжполюсних зонах матриці з поліградієнтним середовищем на основі пластин у формі рівнобедреної трапеції та трикутних пластин з округленою вершиною. За результатами аналізу встановлені максимальні значення силових характеристик електромагнітного поліградієнтного сепаратора.

Наукова новизна. Для багатокомпонентної пластинчастої матриці поліградієнтного електромагнітного сепаратора визначені геометричні розміри елементів матриці різної форми, при яких силові характеристики пристрою набувають максимального значення.

Практична значимість. Результати дослідження можуть бути використані для покращення силових характеристик базової конструкції електромагнітного поліградієнтного сепаратора.

Ключові слова: електромагнітний сепаратор, поліградієнтна матриця, силові характеристики, ефективна площа робочої зони.

Вступ. Важливим етапом різних технологічних процесів переробки вихідної сировини, проміжних або кінцевих продуктів є поділ сумішей сипких матеріалів, виділення твердої фракції з рідкого або газоподібного середовища. В даний час для цих цілей застосовуються технічні пристрої – сепаратори. На практиці широке застосування отримав метод магнітної сепарації, заснований на використанні відмінностей в магнітній сприйнятливості часток поділюваних середовищ [1].

Найбільш складним є процес вилучення з будь-яких немагнітних середовищ (газу, рідини, сипких речовин) слабомагнітних та дрібнодисперсних феромагнітних включень розміром до 1 мм. Для видалення таких включень застосовуються різноманітні за конструкцією магнітні сепаратори, в яких робочий процес відбувається у матриці з поліградієнтним середовищем, намагнічені елементи якого створюють магнітні сили, достатні для вилучення включень. Слід зазначити, що більшість існуючих пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації призначена для очищення від дрібнодисперсних феромагнітних домішок рідинних середовищ (пульпи) або запиленних газів [2, 3]. Для очищення сипких матеріалів знайшли застосування переважно відкриті багатополюсні магнітні системи сепараторів, які є недостатньо ефективними при видаленні феромагнітних домішок розміром до 1 мм [4, 5].

У зв'язку зі зростанням вимог до якості продукції проблема вилучення високодисперсних феромагнітних включень, які виникають в процесі зносу обладнання, є актуальною й для сипких матеріалів (борошна, круп, керамічної сировини тощо). Одним із

напрямок підвищення ефективності магнітної сепарації сипких середовищ є впровадження саме поліградієнтних магнітних сепараторів. Однак наявність в робочих зонах поліградієнтних матриць сепараторів невеликих за розмірами повітряних проміжків, де саме й відбувається сепарація матеріалів, часто унеможливує їх застосування для очищення сипких речовин, оскільки призводить до швидкої закупорки матриці. В свою чергу, необґрунтоване збільшення робочих зазорів впливає на силові характеристики пристроїв, значно зменшуючи їх. Тому актуальним завданням є вдосконалення пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації сипких середовищ та покращення їх силових характеристик.

Постановка завдання. При дослідженнях силових магнітних полів критерієм здатності магнітосепаруючих пристроїв до вилучення феромагнітних включень, а, отже, критерієм їх ефективності служить питома наведена сила $f_{np} = H \text{grad}H$. Форма, взаємне розташування та геометричні розміри елементів поліградієнтної матриці повинні забезпечувати як високу напруженість H магнітного поля в робочій зоні, так і його максимальну неоднорідність (градієнт напруженості $\text{grad}H$). У цій роботі ставиться завдання дослідити вплив форми пластинчастих елементів багатокомпонентної поліградієнтної матриці на силові характеристики електромагнітного сепаратора.

Результати дослідження. В попередніх роботах [6-9] авторами одержані наступні результати:

1. Запропонована вдосконалена конструкція електромагнітного сепаратора з пластинчастим поліградієнтним середовищем (рис.1) [6, 7]. В якості елементарних моноструктур середовища обрані трикутні елементи, які здатні забезпечувати достатньо сильні та неоднорідні магнітні поля в робочих проміжках [3].

2. Досліджено вплив геометричних розмірів та взаємного розташування трикутних пластинчастих елементів поліградієнтної матриці електромагнітного сепаратора (рис.1) на силові характеристики [8, 9]. При дослідженнях приймалися наступні співвідношення основних геометричних розмірів робочої зони матриці (рис.2): $X_1 = b/a = 0,2; 0,3; 0,4;$ $X_2 = \alpha = 0,11\pi; 0,22\pi; 0,28\pi; 0,33\pi; 0,39\pi; 0,44\pi$. Робоча ширина матриці a залишалася незмінною ($a = 180$ мм).

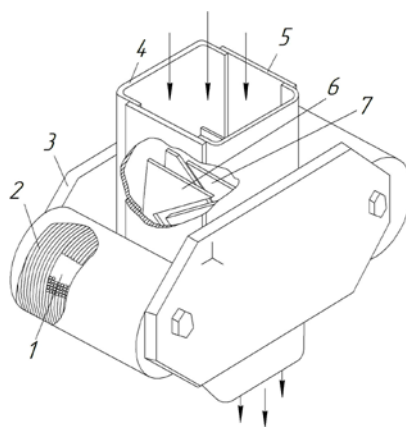


Рис.1. Конструкція електромагнітного сепаратора з пластинчастим поліградієнтним середовищем: 1 – циліндричне осердя; 2 – котушка намагнічування; 3 – полюс; 4 – феромагнітні стінки матриці; 5 – неферомагнітні стінки матриці; 6, 7 – феромагнітні пластини на основі трикутних елементів

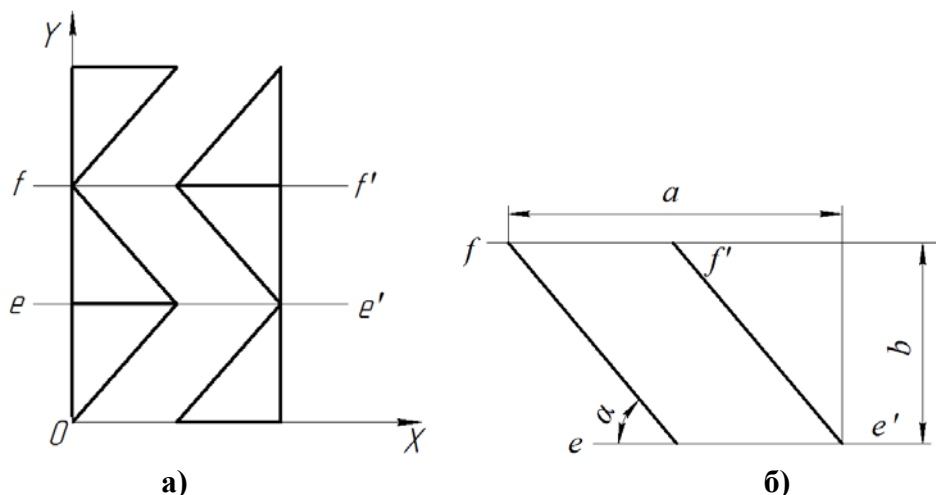


Рис.2. Робоча зона поліградієнтної матриці:
 а - геометрія робочої зони; б - основні геометричні розміри робочої зони

3. Визначений раціональний варіант поліградієнтної матриці сепаратора, який характеризується наступними геометричними параметрами $X_1=b/a=0,18$ та $X_2=\alpha=0,15\pi$. Раціональні розміри трикутних елементів матриці обрані з точки зору забезпечення високого значення ефективної площі робочої зони γ , в якій величина силового параметру f_{np} задовольняє вимозі $f_{min} \leq f_{np} \leq f_{max}$, де f_{min} – мінімальне граничне значення силової характеристики $f_{min}=(H \text{grad}(\mathbf{H}))_{min}$, за якої забезпечується, виходячи з досвіду проектування магнітних сепараторів, достатня ефективність видалення феромагнітних включень [9].

Для визначення раціональних варіантів поліградієнтної матриці був задіяний метод порівняльного аналізу силових характеристик досліджуваних варіантів структур матриці з відповідними характеристиками базового варіанту сепаратора ($X_1=b/a=0,28$, $X_2=\alpha=0,11\pi$), розробленого емпіричним шляхом [6]. Встановлено, що в робочій зоні поліградієнтного середовища з раціональними параметрами ($X_1=b/a=0,18$; $X_2=\alpha=0,15\pi$) максимальні напруженість H_{max} та градієнт напруженості $\text{grad}(\mathbf{H})_{max}$ магнітного поля перевищують у 5 разів відповідні показники базового варіанту сепаратора. Розраховане значення ефективної площі робочої зони γ для раціональної структури, відповідно, у 10,6 разів більше, ніж у базової.

Для вирішення завдання по дослідженню впливу форми елементів багатокомпонентної пластинчастої матриці електромагнітного поліградієнтного сепаратора на його силові характеристики були розглянуті елементарні монопластини у формі рівнобедреної трапеції (рис.3, а) та трикутника з округленою вершиною (рис.3, б). Прийняті наступні діапазони варіювання геометричних розмірів пластин: $d/b=0,1\dots1,2$, де d – верхня основа трапеції - для пластини у формі рівнобедреної трапеції (рис. 3, а); $R=2,5\dots42,5$ мм, де R - радіус закруглення при вершині пластини-трикутника - для пластини-трикутника з округленою вершиною (рис.3, б).

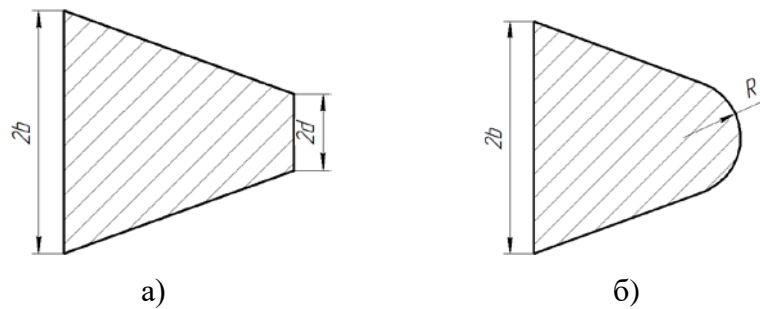


Рис.3. Пластини поліградієнтного середовища:
 а – у формі рівнобедреної трапеції; б – з округленою вершиною

Проведено чисельно-польовий аналіз розподілу магнітного поля в робочих міжполюсних зонах матриці з поліградієнтним середовищем на основі пластин у формі рівнобедреної трапеції та пластин з округленою вершиною. Розраховувались максимальні значення напруженості H_{\max} , градієнту напруженості $\text{grad}H_{\max}$ та приведеної магнітної сили f_{\max} в робочій зоні сепаратора при зміні параметру d/b (для пластин у формі рівнобедреної трапеції) та радіусу R (для пластини-трикутника з округленою вершиною). Задачу було вирішено в двомірній лінійній постановці.

Магнітне поле в робочій зоні поліградієнтного сепаратора описується системою рівнянь Максвелла у магнітостатичному наближенні у відсутності електричного струму, доповненою матеріальними рівняннями, що визначають фізичні властивості матеріалів [8, 9],

$$\begin{aligned} \nabla \times H &= 0, \\ \nabla \cdot B &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де H – вектор напруженості магнітного поля; B – вектор магнітної індукції.

Рівняння, що описує стан феромагнітних елементів та оточуючого середовища (повітря), має вигляд

$$B = \mu_0 \mu_r H, \quad (2)$$

де μ_r - відносна магнітна проникність феромагнітного матеріалу та повітря ($\mu_r = 1$).

При розв'язанні задачі у лінійній постановці залежність магнітної проникності μ_r від напруженості H магнітного поля не враховується.

При аналізі робочого магнітного поля сепаратора завдання формулюються відносно векторного магнітного потенціалу A (задається співвідношення $A = \text{rot}B$). Тому стаціонарна крайова задача, що підлягає розв'язанню відносно, набуває виду

$$\nabla^2 A = 0. \quad (3)$$

Розв'язання рівняння (1) з відповідними граничними умовами здійснено методом скінченних елементів за допомогою програми ELCUT 5.6.

Двомірні геометричні моделі робочих міжполюсних зон (рис. 4) для досліджуваних структур поліградієнтних середовищ розроблені з урахуванням наступних припущень та обмежень:

1. Магнітне поле в межах робочих міжполюсних зон є плоскопаралельним.
2. Вплив тривимірності магнітного поля для всіх точок робочої зони однаковий і залежить тільки від товщини пластин і відстані між пластинами в матриці.

3. Сталь полюсів має нескінченну магнітну проникність (ідеальне залізо).

4. Вплив на розподіл поля геометрії осердь і котушок, що намагнічують, незначний і їм можна знехтувати.

При описі фізичних властивостей задачі задавалася відносна магнітна проникність повітря $\mu_r=1$. Джерело магнітного поля задавалося з використанням двох граничних умов у напрямку осі OY щодо векторного магнітного потенціалу: $A=0$ Вб/м та $A=\text{const}$.

Розрахункова область (рис. 4) обмежена контуром $abcdefgh$, для якого задавалися наступні граничні умови:

ah – силова лінія, для якої векторний магнітний потенціал $A=0$ (умова Діріхле);

de – силова лінія, для якої також задається гранична умова Діріхле, що визначає поведінку нормальної складової індукції на межі. На ділянці de значення векторного магнітного потенціалу є постійним і дорівнює $A=0,0365$ Вб/м. Воно задається, виходячи із забезпечення певного значення напруженості магнітного поля, яке має бути не нижче, ніж в базовій конструкції сепаратора;

ab, bc, cd, ef, fg, gh – границі, що відповідають ідеальним сталевим поверхням, для яких $H_t=0$ (однорідна умова Неймана). Така гранична умова є природньою, так як встановлюється за умовчанням на всіх тих сторонах, що утворюють зовнішню межу, де явно не вказана інша гранична умова.

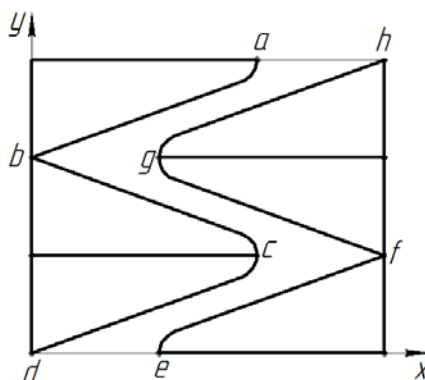


Рис. 4. Розрахункова модель робочої зони
(на прикладі пластин-трикутників з округленими вершинами)

Результати розрахунків силових характеристик ($H_{\text{max}}, \text{grad}H_{\text{max}}, f_{\text{max}}$) поля для пластин у формі рівнобедреної трапеції та з округленою вершиною наведені в табл. 1. Залежності ефективної площі робочої зони матриці γ від геометричних розмірів досліджуваних пластин наведені на рис. 5.

Як видно з табл.1, силові характеристики $H_{\text{max}}, \text{grad}H_{\text{max}}, f_{\text{max}}$ поліградієнтного сепаратора з матрицею на основі пластин трапецеїдальної форми набувають максимального значення при $d/b=0,8$ та становлять: $H_{\text{max}}=381,9$ кА/м; $\text{grad}H_{\text{max}}=166,1$ кА/м²; $f_{\text{max}}=53,0 \cdot 10^9$ А²/м³, відповідно. Залежність ефективної площі робочої зони γ від співвідношення геометричних розмірів пластин d/b має екстремальний характер (рис. 5, а). Найбільше значення $\gamma=54,7\%$ отримане при $d/b=0,9$.

Таблиця 1

Результати розрахунків силових характеристик поля

Для пластин у формі рівнобедреної трапеції				Для пластин з округленою вершиною			
d/b	H_{\max} , кА/м	$\text{grad}H_{\max}$, кА/м ²	f_{\max} , А ² /м ³	R , мм	H_{\max} , кА/м	$\text{grad}H_{\max}$, кА/м ²	f_{\max} , А ² /м ³
0,1	155,6	77,8	$11,4 \cdot 10^9$	2,5	163,0	84,4	$12,1 \cdot 10^9$
0,2	158,8	79,0	$10,4 \cdot 10^9$	5	153,9	76,9	$10,3 \cdot 10^9$
0,3	172,1	83,2	$13,6 \cdot 10^9$	12,5	157,7	74,5	$11,4 \cdot 10^9$
0,4	206,9	101,0	$17,3 \cdot 10^9$	15	170,2	78,5	$12,9 \cdot 10^9$
0,5	239,5	115,2	$26,3 \cdot 10^9$	20	219,4	95,1	$20,1 \cdot 10^9$
0,6	269,0	130,3	$35,1 \cdot 10^9$	22,5	245,4	105,1	$25,2 \cdot 10^9$
0,7	349,5	160,3	$52,6 \cdot 10^9$	27,5	249,7	116,7	$28,4 \cdot 10^9$
0,8	381,9	166,1	$53,0 \cdot 10^9$	32,5	261,5	130,0	$33,2 \cdot 10^9$
0,9	352,1	137,4	$44,6 \cdot 10^9$	35	271,1	135,2	$35,9 \cdot 10^9$
1,0	342,4	107,4	$27,6 \cdot 10^9$	37,5	275,6	137,8	$37,1 \cdot 10^9$
1,1	322,4	106,1	$22,6 \cdot 10^9$	40	274,2	137,1	$36,9 \cdot 10^9$
1,2	320,8	104,4	$21,8 \cdot 10^9$	42,5	274,0	137,0	$36,8 \cdot 10^9$

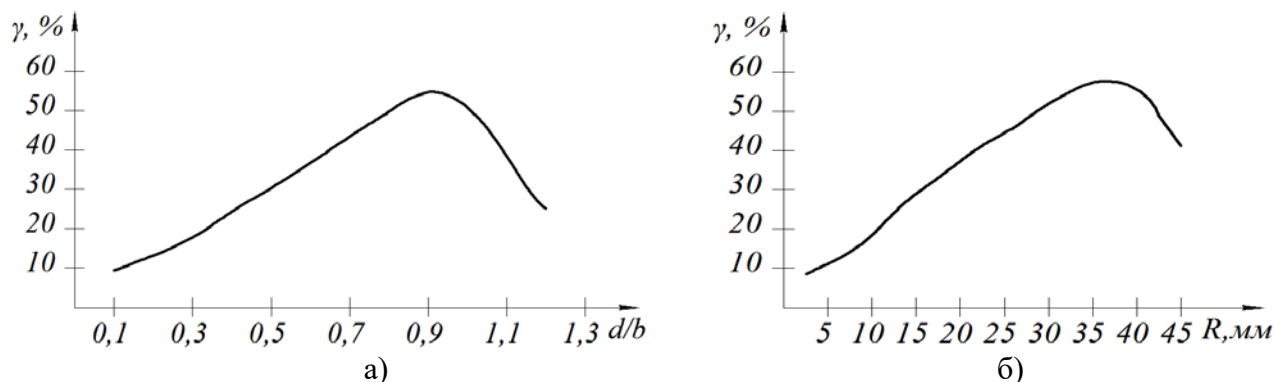


Рис.5. Залежність ефективної площі робочої зони матриці γ від геометричних розмірів пластин:
 а - для пластин трапецеїдальної форми;
 б - для пластин у формі трикутника з округленою вершиною

Силкові характеристики H_{\max} , $\text{grad}H_{\max}$, f_{\max} поліградієнтного сепаратора з матрицею на основі пластин з округленою вершиною набувають максимального значення при $R=37,5$ мм та становлять: $H_{\max}=275,6$ кА/м; $\text{grad}H_{\max}=137,8$ кА/м²; $f_{\max}=37,1 \cdot 10^9$ А²/м³. Величина ефективної площі робочої зони γ в досліджуваному діапазоні змінювання радіусу закруглення R (рис. 5, б) поступово зростає та набуває найбільшого значення при $R=37,5$ мм - $\gamma=57,6\%$.

Висновки. Враховуючи, що для базової конструкції електромагнітного сепаратора з параметрами $X_1=b/a=0,28$ та $X_2=\alpha=0,11\pi$ значення ефективної площі γ робочої зони та максимальної приведеної магнітної сили f_{\max} становлять, відповідно, $\gamma=7\%$ та $f_{\max}=10,8 \cdot 10^9$ А²/м³, то, виходячи з вищевикладеного, можна зробити висновок, що незначна зміна форми трикутних пластин, яку можна отримати шляхом механічної доробки, призведе до суттєвого покращення силових характеристик базової конструкції електромагнітного

сепаратора. Зокрема, використання пластин у формі рівнобедреної трапеції та з округленою вершиною дозволить збільшити показник ефективної площі робочої зони γ у 7,8 та 8,2 рази, відповідно. У той самий час слід відмітити, що силові характеристики електромагнітного сепаратора базової конструкції при змінюванні форми пластин матриці поступаються відповідним силовим характеристикам електромагнітного сепаратора раціональної конструкції з пластинчастою матрицею на основі трикутних елементів.

Література

1. Svoboda J. Magnetic Techniques for the Treatment of Materials [Text] / J. Svoboda // Kluwer Academic Publishers, Boston. – 2004. – P. 99.
2. Wei Ge. Magnetic matrices used in high gradient magnetic separation (HGMS): A review [Text] / Ge. Wei, A. Encinas, E. Araujo, Sh. Song // Results in Physics. – 2017. – 7. – P.4278-4286.
3. Ren, L. Magnetic field characteristics analysis of a single assembled magnetic medium using ANSYS software [Text] / L. Ren, Sh. Zeng, Y. Zhang // International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. – 25. – P. 479–487.
4. Пилов П. И. Сепарация ультрадисперсных слабомагнитных материалов в сверхсильных магнитных полях [Текст] / П. И. Пилов, В. Ю. Шутов, Н. Г. Кабакова, Л. А. Шатова // Збагачення корисних копалин. – 2017. – Вип. 68(109). – С. 133-138.
5. Просвирин В. И. Особенности извлечения ферропримесей из сыпучих сельскохозяйственных материалов [Текст] / В. И. Просвирин, Е. П. Мастюкин, И. О. Кузнецов, В. Б. Гулевский // Науковий вісник ТДАТУ. – 2011. – Вип. 1, Том 1. – С. 75-78.
6. Загирняк М. В. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования: моногр. [Текст] / М. В. Загирняк, Ю. А. Бранспиз, И. А. Шведчикова; под ред. М.В. Загирняка. – К.: Техніка, 2011. – 224 с.
7. Патент на корисну модель № 103156, Україна, В03С 1/00 (2015.01). Електромагнітний сепаратор / Шведчикова І. О., Романченко Ю. А.; патентовласник: СНУ і. В. Даля; заявл. 05.05.15; опубл. 10.12.15, Бюл. № 23. – 5 с.
8. Shvedchykova I. Comparative analysis of inhomogeneity degree of magnetic field of polygradient magnetic separators for purification of bulk materials [Text] / I. Shvedchykova, Ju. Romanchenko, I. Nikitchenko // Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), 15-17 Nov. 2017, Kremenchuk, Ukraine, p.144 – 147. IEEE Catalog Number: CFP17K83-ART.

References

1. Svoboda, J. (2004). Magnetic Techniques for the Treatment of Materials. *Kluwer Academic Publishers*, 99.
2. Wei, Ge, Armando, Encinas, Elsie, Araujo, Shaoxian, Song (2017). Magnetic matrices used in high gradient magnetic separation (HGMS): A review. *Results in Physics*. 7, 278-4286.
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. Pilov, P. I., Shutov, V. Yu., Kabakova, N. G., Shatova, L. A. Separation of ultradispersed low magnetic materials in superstrong magnetic fields. *Zbahachennia korysnykh kopalyn*, 2017, no. 68(109). pp. 133-138.
5. Prosvirin V. I., Mastjukin E. P., Kuznetsov I. O., Gulevskiy V. B. (2011). Separatsiya ul'tradispersnykh slabomagnitnykh materialov v sverkhshil'nykh magnitnykh polyakh [Extracting Features of ferroimpurities extraction from bulk agricultural materials] *Naukovyi visnyk TDATU – Scientific Herald TSATU*, 1, 75-78 [in Ukrainian].
6. Zagirnyak, M. V., Branspiz, Ju. A., Shvedchikova, I. A. (2011). *Magnitnye separatory. Problemy proektirovaniya* [Magnetic separators. Problems of designing]. Kiev: Tehnika [in Ukrainian].
7. Shvedchykova, I. O., Romanchenko, Yu. A. (2015). Elektromahnitnyi separator [Electromagnetic separator]. Ukrainian patent, no. 103156.
8. Shvedchykova, I., Romanchenko, Ju., Nikitchenko, I. (2017). Comparative analysis of inhomogeneity degree of magnetic field of polygradient magnetic separators for purification of bulk materials. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, 144 – 147 [in Ukrainian].
9. Gerlici, J., Shvedchykova, I.O., Romanchenko, Yu.A., Nikitchenko, I.V. (2018). Vyznachennia ratsionalnykh heometrychnykh parametriv plastynchastykh elementiv mahnitnoi matrytsi

9. Gerlici J. Визначення раціональних геометричних параметрів пластинчастих елементів магнітної матриці поліградієнтного сепаратора [Текст] / J. Gerlici, I. O. Шведчикова, Ю. А. Романченко, І.В. Нікітченко // Електротехніка і електромеханіка. – 2018. - № 4. – С. 58-62.
10. Пантелят М. Г. Использование векторного магнитного потенциала в конечноэлементном анализе нестационарных трёхмерных электромагнитных полей в проводящих средах / М. Г. Пантелят, Н. Г. Шульженко // Электротехника и электромеханика. – 2007. – № 5. – С. 42 – 47.
11. Bíró O. On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents [Text] / O. Bíró, K. Preis // IEEE Transactions on Magnetics. – 1989. – v. 25, No. 4. – P. 3145 – 3159.

- polihradiientnoho separatora [Determination of rational geometrical parameters of plate elements of magnetic matrix of a polygradient separator] *Elektrotehnika i elektromekhanika –Electrical engineering and electromechanics*, 4, 58-62 [in Ukrainian].
10. Pantelyat, M. G., Shul'zhenko, N. G. (2007). Ispol'zovanie vektornogo magnitnogo potentsiala v konechnoelementnom analize nestatsionarnykh trekhmernykh elektromagnitnykh poley v provodyashchikh seredakh [The use of vector magnetic potential in finite element analysis of nonstationary three-dimensional electromagnetic fields in conducting medium]. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering and electromechanics*, 5, 42 – 47 [in Ukrainian].
11. Bíró, O., Preis, K. (1989). On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents. *IEEE Transactions on Magnetics*. 25, 4, 3145 – 3159.

SHVEDCHUKOVA IRINA

ishved89@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3005-7385

Researcher ID: O-2765-2018

*Department Of Energy Management and Applied
Electronics*

Kiev National University of Technologies & Design

ROMANCHENKO YULIYA

romanchenkojulia@i.ua

ORCID: 0000-0001-6579-6474

Researcher ID: 57190438710

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИГРАДИЕНТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ФОРМЫ ПЛАСТИН МАТРИЦЫ

ШВЕДЧИКОВА И. А. *, РОМАНЧЕНКО Ю. А. **

**Киевский национальный университет технологий и дизайна*

***Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля*

Цель. Исследование влияния формы элементов многокомпонентной пластинчатой матрицы полиградієнтного електромагнітного сепаратора на его силовые характеристики.

Методика. При проведении анализа распределения магнитного поля в рабочей зоне электромагнитного сепаратора используется метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе ELCUT 5.6.

Результаты. Проведен численно-полевой анализ распределения магнитного поля в рабочих межполюсных зонах матрицы с полиградієнтной средой на основе пластин в форме равнобедренной трапеции и треугольных пластин со скругленной вершиной. По результатам анализа установлены максимальные значения силовых характеристик электромагнитного полиградієнтного сепаратора.

Научная новизна. Для многокомпонентной пластинчатой матрицы полиградієнтного электромагнітного сепаратора определены геометрические размеры элементов матрицы различной формы, при которых силовые характеристики устройства приобретают максимальное значение.

Практическая значимость. Результаты исследования могут быть использованы для улучшения силовых характеристик базовой конструкции электромагнитного полиградієнтного сепаратора.

Ключевые слова: электромагнитный сепаратор, полиградієнтная матрица, силовые характеристики, эффективная площадь рабочей зоны.

**RESEARCH OF EFFECT OF MATRIX PLASTIC ELEMENTS SHAPE ON POWER
CHARACTERISTICS OF ELECTROMAGNETIC POLYGRADIENT SEPARATOR**

SHVEDCHUKOVA I. O. *, ROMANCHENKO J. A. **

* Kyiv National University of Technologies and Design

** Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

Purpose. Research of influence of elements shape of a multicomponent lamellar matrix of polygradient electromagnetic separator on its strength characteristics.

Methodology. For analysis of magnetic field distribution in working area of electromagnetic separator the finite element method has been used, implemented in ELCUT 5.6 software package.

Findings. A numerical-field analysis of magnetic field distribution in working interpolar zones of matrix with a polygradient medium on the basis of inserts in form of an isosceles trapezium and triangular plates with a rounded apex has been carried out. According to analysis results, the maximum values of power characteristics of electromagnetic polygradient separator have been established.

Originality. For a multicomponent lamellar matrix of polygradient electromagnetic separator certain geometrical dimensions of matrix elements of various shapes, at which power characteristics of device acquire the maximum value have been defined.

Practical value. The results of research can be used for improvement of power characteristics of basic design of electromagnetic polygradient separator.

Key words: electromagnetic separator, polygradient matrix, power characteristics, effective square of working area.

УДК 620.179

СЕБКО В.В. *, ЗДОРЕНКО В.Г. **

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Київський національний університет технологій та дизайну

БЕЗКОНТАКТНИЙ МЕТОД ТРИПАРАМЕТРОВОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗРАЗКА ФЕРОМАГНІТНОЇ РІДИНИ

Мета. Метою статті є дослідження методу трипараметрового контролю зразка феромагнітної рідини, реалізація якого здійснюється на основі безконтактного трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕП) зі зразками феромагнітних рідин у повздовжньому магнітному полі.

Методика. Використана методика дослідження зразків феромагнітної рідини під час реалізації трипараметрового електромагнітного методу вимірювального контролю фізико-хімічних характеристик феромагнітних рідин на основі теплового ТЕП.

Результати. Досліджено трипараметровий метод вимірювального контролю відносної магнітної проникності μ_r , питомої електричної провідності σ і температури t зразка феромагнітної рідини, що контролюється, на основі вимірювань та аналізу сигналів теплового безконтактного трипараметрового ТЕП.

Наукова новизна. Розвинуто теоретичні основи роботи безконтактного теплового ТЕП зі зразком феромагнітної рідини на основі реалізації трипараметрового методу вимірювального контролю магнітних, електричних і температурних параметрів.

Практична значимість. Реалізація запропонованого трипараметрового методу на основі безконтактного теплового ТЕП здійснюється задля поопераційного контролю фізико-хімічних характеристик магнітних рідин під час їхнього виготовлення і експлуатації з урахуванням раціональних критеріїв якості.

Ключові слова: феромагнітна рідина, фізико-хімічні характеристики, безконтактний перетворювач, компоненти сигналів, магнітна проникність, питома електрична провідність, температура, алгоритм реалізації, поопераційний контроль зразка, трипараметровий метод вимірювального контролю.

Вступ. На сьогодні, важливе значення набуває розвиток методів та пристроїв контролю фізико-хімічних параметрів феромагнітних рідин. Створені у середині минулого сторіччя однопараметрові методи контролю магнітних, електричних і температурних параметрів феромагнітних рідин [1-3], поряд з безсумнівними перевагами: простота схемних реалізацій, порівняно низькі витрати під час вимірювання фізико-хімічних параметрів, мали суттєвий недолік, який пов'язано з невисокою параметричною надійністю, що у свою чергу, призводить до зменшення міжопераційних інтервалів, при цьому надійність відповідних пристроїв мала тенденцію до зниження, незалежно від їхньої експлуатації. До недоліків існуючих безконтактних методів, також слід віднести низьку вірогідність контролю, інструментальна складова якої зменшується за рахунок виникнення достатньо суттєвих значень сумарної похибки вимірювань фізико-хімічних параметрів феромагнітних рідин. В цьому напрямі має важливий теоретичний і практичний інтерес сумісний вимірювальний багатопараметровий контроль промислових рідин, методами, реалізація яких здійснюється на основі електромагнітних перетворювачів [4-9]. Перевагами електромагнітних методів та засобів контролю є підвищення вірогідності контролю за рахунок зменшення значень сумарної похибки вимірювань, простота схемних реалізацій та функцій перетворення, висока

надійність та чутливість пристроїв (у тому числі і автоматизованих), можливість визначення електромагнітних та фізико-хімічних параметрів феромагнітних рідин за допомогою як сумісних так і селективних засобів. У загальному випадку, основними фізико-хімічними параметрами феромагнітних рідин є намагніченість j , відносна магнітна проникність μ_r , питомий електричний опір p і температура t .

Таким чином, виникає важлива науково-практична проблема, сутність якої полягає у подальшому розвитку безконтактних методів та пристроїв електромагнітного контролю фізико-хімічних параметрів феромагнітних рідин. При цьому, особливе значення набуває дослідження безконтактних методів на основі трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕП), що обумовлено відносним спрощенням функцій перетворення та відсутністю впливу на результати вимірювального контролю температурної похибки, яка викликана зміною значення опору намагнічувальної котушки [4]. Слід визначити, що на сьогодні, практично не досліджено електромагнітні методи для контролю параметрів феромагнітних рідин широкого асортименту на основі ТЕП. Немає даних також, щодо особливостей роботи ТЕП зі зразками феромагнітної рідин, різних концентрацій, які піддаються нагріванню у процесі контролю, при цьому визначення температури має важливе самостійне значення, оскільки термозалежними являються не тільки електромагнітні параметри рідини, що контролюється, а й інші фізико-хімічні характеристики, наприклад, ефективний коефіцієнт в'язкості $\eta_{\text{эф}}$, коефіцієнт теплопровідності χ , коефіцієнт теплоємності c , коефіцієнт поверхневого натягу δ . Всі ці параметри, дозволяють здійснювати оцінювання якості феромагнітних рідин під час виготовлення й експлуатації.

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи є дослідження методу трипараметрового контролю зразка феромагнітної рідини, реалізація якого здійснюється на основі теплового безконтактного трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕП) зі зразками феромагнітних рідин у повздовжньому магнітному полі.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Дослідити алгоритм контролю магнітних, електричних і температурних параметрів зразка феромагнітної рідини.
2. Навести основні співвідношення, які описують реалізацію безконтактного трипараметрового методу контролю параметрів μ_r , p і t феромагнітних рідин.

Результати дослідження. Скориставшись результатами робіт [1-9], далі необхідно дослідити алгоритм реалізації безконтактного трипараметрового методу вимірювального контролю магнітних, електричних та температурних параметрів феромагнітної рідини. Слід визначити, що застосування відомих вихорострумів методів, на основі ТЕП, які засновано на залежностях різницевої ЕРС $E_{\text{вн}}$ та її фазового кута зсуву $\varphi_{\text{вн}}$ [5], призводить до обмеження асортименту магнітних рідин, що контролюються, оскільки вимірювальний контроль магнітних, електричних та температурних параметрів, суттєво ускладнюється за рахунок підвищення значень апаратних похибок вимірювань, які пов'язано з недокомпенсацією та перекомпенсацією. При цьому, визначення сумарної ЕРС E_{Σ} та фазового кута зсуву φ_0 [5], надає змогу підвищити інструментальну складову вірогідності контролю параметрів μ_r , p і t феромагнітних рідин (враховуючи, що досліджуються феромагнітні рідини, які мають малі розміри частинок феромагнетика, що перешкоджає осіданню частинок). У даному випадку,

вплив силових гравітаційних полів, є можливим не враховувати, тому що всі частки врівноважує в'язкість рідини, у свою чергу, відцентрована сила, врівноважується силою тяжіння феромагнітних частинок у однорідному магнітному полі [5]. Слід визначити, що вимірювальний електромагнітний контроль магнітних, електричних і температурних параметрів феромагнітних рідин, має також важливе самостійне значення, оскільки дозволяє одержати найбільш повну інформацію стосовно вимірюваних параметрів досліджуваних зразків феромагнітної рідини, одним і тим же електромагнітним перетворювачем в одній і тій же зоні контролю. Спочатку, для отримання універсальних функцій перетворення, необхідно визначити нормовані параметри, які пов'язують сигнали теплового ТЕП з фізико-хімічними характеристиками зразка феромагнітної рідини.

На рис.1, з урахуванням схемних реалізацій, які наведено у роботах [4-9], розглянуто схему включення теплового ТЕП зі зразком феромагнітної рідини. Схема містить до себе: ТЕП, який виконує одночасно функції намагнічування зразка, вимірювання ЕРС з торців вимірювальної котушки ТЕП і нагрівання зразка у процесі контролю за допомогою нагрівача (нагрівач розташований у робочому перетворювачі теплового ТЕП – РП). Два ідентичних перетворювача робочий і опорний – РП і ОП. Схема також містить: Г – генератор синусоїдальних сигналів, частотомір – Ч, амперметр А, вольтметри V_1, V_2 і V_3 , зразковий опір – R_3 , фазометр – Ф, зразок феромагнітної рідини – ЗР, який розташований у скляній трубці (радіус трубки $a = 10\text{мм}$ і довжина $l = 0,4\text{м}$, по торцях скляної трубки передбачено увід електродів для проходження струму I , який подається з генератору – Г). У якості контрольних методів вимірювання температури зразка феромагнітної рідини, передбачено застосування термопари ТХК.

Таким чином, нагрівання зразка у процесі контролю, за допомогою нагрівача – Н, здійснюється для імітації реальних умов експлуатації, а також з метою пошуку оптимальних критеріїв для забезпечення зберігання і транспортування феромагнітної рідини.

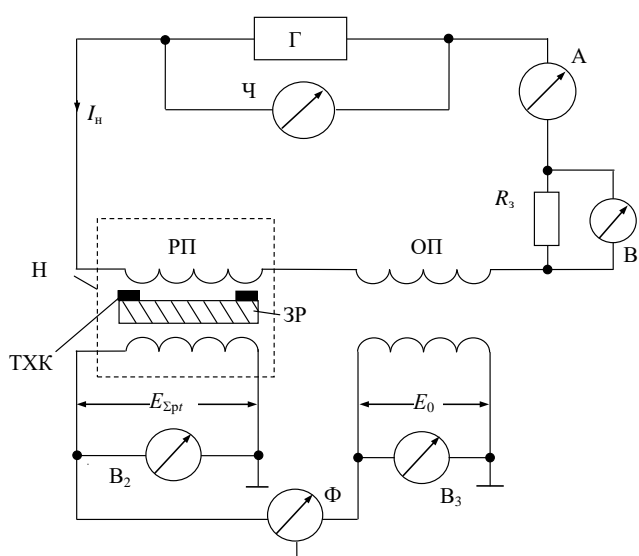


Рис.1. Схема включення теплового ТЕП для безконтактного вимірювального контролю магнітних, електричних та температурних параметрів зразка феромагнітної рідини

Для визначення робочої точки на універсальних функціях перетворення теплового ТЕП, спочатку встановлюють довільну частоту генератора f , далі за допомогою вольтметрів V_2 і V_3 – вимірюють ЕРС E_0 , $E_{\Sigma pt}$, потім за допомогою фазометру Φ – фазовий кут зсуву φ_0 . На рис.2, наведено векторну діаграму ЕРС та фазових кутів зсуву теплового ТЕП зі зразком феромагнітної рідини.

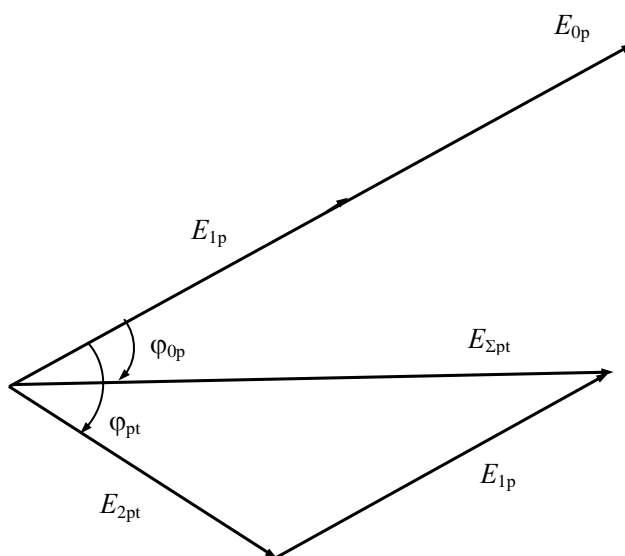


Рис.2. Векторна діаграма ЕРС та фазових кутів зсуву теплового ТЕП зі зразком феромагнітної рідини

Далі з урахуванням теореми косинусів, необхідно навести формули для визначення ЕРС E_{2pt} та фазового кута зсуву φ_{pt} [5]

$$E_{2pt} = \sqrt{E_{\Sigma pt}^2 + E_{0p}^2 - 2E_{\Sigma pt}E_{0p} \cos \varphi_{0pt}} \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{pt} = \frac{E_{\Sigma pt} \sin \varphi_{0pt}}{E_{\Sigma pt} \cos \varphi_{0pt} - E_{0p}} \quad (2)$$

Нормований параметр k_{pt} знаходять за формулою:

$$k_{pt} = \frac{\sqrt{E_{\Sigma pt}^2 + E_{0p}^2 - 2E_{\Sigma pt}E_{0p} \cos \varphi_{0pt}}}{E_{0p} \eta k_{pt}} \quad (3)$$

За допомогою універсальних функцій перетворення теплового ТЕП, знаходимо нормовані характеристики: параметр x_{pt} та фазовий кут зсуву φ_{pt} , при цьому x_{pt} і φ_{pt} є термозале-

жними характеристиками. В табл.1, наведено розрахункові значення універсальних функцій перетворення теплового ТЕП зі зразком феромагнітної рідини.

Таблиця 1

Залежності інформативних параметрів теплового ТЕП зі зразком феромагнітної рідини

x_{pt}	k_{pt}	φ_{pt}	$tg \varphi_{pt}$
0	0	0	0
0,2	0,999979	0,286	0,004992
0,4	0,999667	1,146	0,020001
0,6	0,998318	2,574	0,044925
0,8	0,994717	4,559	0,07657
1,0	0,987275	7,07	0,123395
1,2	0,974239	10,045	0,175318
1,4	0,954059	13,382	0,23356
1,6	0,925849	16,939	0,295641
1,8	0,889775	20,546	0,358595
2,0	0,847162	24,024	0,419298
2,2	0,800221	27,221	0,475096
2,4	0,751507	30,027	0,52407
2,6	0,703368	32,389	0,565295
2,8	0,657592	34,303	0,5987
3,0	0,615292	35,805	0,624915
3,2	0,576979	36,952	0,644934
3,4	0,542715	37,811	0,659926
3,6	0,512274	38,449	0,671062
3,8	0,48528	38,925	0,679369
4,0	0,461295	39,286	0,68567
4,2	0,439888	39,572	0,690662
4,4	0,420662	39,808	0,694781
4,6	0,403273	40,015	0,698394
4,8	0,387432	40,204	0,701692
5,0	0,372904	40,382	0,704799

Якщо значення параметра x_{pt} , потрапляє у встановлений діапазон, в якому чутливість теплового ТЕП до електромагнітних μ_r , ρ та температурних параметрів t є достатньо високою, зразок феромагнітної рідини піддається нагріванню (якщо ні, необхідно здійснювати спочатку всі попередні вимірювальні процедури).

Знаючи параметр x_{pt} , знаходимо питомий електричний опір та температуру феромагнітної рідини за формулами:

$$\rho_{pt} = \frac{\mu_0 \omega \alpha_n^2 \sqrt{E_{\Sigma pt}^2 + E_{1p} - 2E_{\Sigma pt} E_{1p} \cos \varphi_{0pt}}}{E_0 x_{pt}^2 k_{pt}} \quad (4)$$

$$t = \frac{1 + \alpha_p t_1}{\alpha_p} \left(\frac{\omega \mu_0 E_{2pl} a_n^2}{\rho_1 x_{jt}^2 E_{0jt} k_{jt}} - 1 \right) + t_1 \quad (5)$$

У табл.2, наведено дані для визначення магнітних, електричних та температурних параметрів зразка феромагнітної рідини.

Таблиця 2

Результати вимірювального контролю магнітних, електричних і температурних параметрів зразка феромагнітної рідини

$t, ^\circ\text{C}$	ρ_t , Ом·м	$t', ^\circ\text{C}$	μ_t
10	0,56	20,09	73,1
20	0,53	29,97	73,9
30	0,62	40,02	75,6
40	0,68	49,98	76,6
50	0,73	59,96	79,9
60	0,80	70,01	83,2
70	0,85	79,87	86,5

Таким чином, досліджуваний електромагнітний метод засновано на вимірюванні та аналізі компонентів сигналів первинного перетворювача (теплового ТЕП), які пов'язані з фізико-хімічними характеристиками феромагнітної рідини.

Висновки. Результати, які наведено у даній статті, дозволяють визначити коло завдань для вирішення важливої наукової і практичної проблеми, сутність якої полягає у подальшому розвитку безконтактних методів та пристроїв електромагнітного контролю фізико-хімічних параметрів феромагнітних рідин. В рамках дослідження цієї проблеми запропоновано трипараметровий електромагнітний метод сумісного вимірювального контролю магнітних, електричних і температурних параметрів зразка феромагнітної рідини, який засновано на вимірюванні та аналізі компонентів сигналів первинного перетворювача (теплового ТЕП) та пов'язаних з ними фізико-хімічних характеристик зразка. Наведено схему включення трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕП) для сумісного контролю відносної магнітної проникності μ_r , питомої електричної провідності σ і температури t зразка феромагнітної рідини. Досліджено алгоритм контролю магнітних, електричних і температурних параметрів зразка феромагнітної рідини. Наведено результати вимірювального контролю параметрів μ_r , ρ і t досліджуваного зразка.

Перспективи подальших досліджень полягають в встановленні оптимальних режимів роботи теплових ТЕП зі зразками феромагнітних рідин, що контролюються, у широкому діапазоні змінення магнітної проникності μ_r при розрахунках та проектуванні автоматизованих пристроїв контролю і керування процесами визначення фізико-хімічних параметрів феромагнітних рідин.

Література

1. Фертман В. Е. Магнитные жидкости/Фертман В.Е. – Минск. – Наука и техника. – 1978. – 208с.
2. Баштовой В. Г Введение в термомеханику магнитных жидкостей/ Баштовой В. Г, Берковский Б. М., Вислович А. Н. – Москва. – Наука и техника. – 1985. – 188 с.
3. Кифер И. И. Испытания ферромагнитных материалов/ Кифер И. И. – М.: Энергия, 1969. – 360 с.
4. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник / [Под ред. В.В. Ключева]. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
5. Себко В. П., Себко В. В. Вихретоковые методы и преобразователя для определения температуры изделий и сред // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ, 1999. – Вип.24. – С. 10–16.
6. Себко В. П., Себко В. В., Салем Ханна Мадаин. Погрешности определения потерь мощности в сплошных изделиях, используемых в переменных магнитных поля // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ, 1999. – Вип.64. – С.111–114.
7. Себко В. В., Здоренко В. Г. Дослідження двохпараметрового методу контролю електричних та температурних параметрів виробів, що нагріваються у процесі контролю // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – Київ: КНУТД «Технічні науки», 2017. – №2 (108). – С. 59 – 67
8. Себко В. В. Використання теорії теплового контактного вихорострумового перетворювача (КРП), стосовно сумісного контролю трьох параметрів немагнітної речовини // «Східно-Європейський журнал передових технологій». – Харків: – 2008. – Вип. ¾ (33). – С. 39-43.
9. Себко В. В. Определение параметров ферромагнитной жидкости с помощью контактного рабочего преобразователя КРП // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. Вып. 44. – С. 15-24.

References

1. Fertman, V. (1978). *Magnitnye zhidkosti* [Magnetic liquids]. Minsk: Nauka i tekhnika [in Russian].
2. Bashtovoy V. G., Berkovskiy B.M. & Vislovich A.N. (1985). *Vvedenie v termomekhaniku magnitnykh zhidkostey* [Introduction to Thermomechanics of Magnetic Liquids]. Moskva: Nauka i tekhnika [in Russian].
3. Kifer I. I. (1969) *Ispytaniya ferromagnitnykh materialov* [Tests of ferromagnetic material] Moskva: Energiya [in Russian].
4. Klyuev V. V. (Eds.). (2005). *Pribory dlya nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdeliy. Spravochnik* [Devices for non-destructive testing of materials and products. Directory] Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
5. Sebko V. P., Sebko V.V. (1999). *Vikhretokovye metody i preobrazovatelya dlya opredeleniya temperatury izdeliy i sred* [Eddy current methods and transducers for determining the temperature of products and media]. Visnyk Kharkivskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu. – Bulletin of Kharkiv State Polytechnic University, Issue 24, 10–16 [in Russian].
6. Sebko V. P., Sebko V. V., Salem Khanna Madain. (1999). *Pogreshnosti opredeleniya poter' mo-shchnosti v sploshnykh izdeliyakh, ispol'zuemykh v peremennykh magnitnykh polya* [Error determination of power loss in continuous products used in alternating magnetic fields]. Visnyk Kharkivskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu. Visnyk Kharkivskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu. – Bulletin of Kharkiv State Polytechnic University, Issue 64, 111–114 [in Russian].
7. Sebko V. V., Zdorenko V. H. (2017). *Doslidzhennia dvokhparametrovoho metodu kontroliu elektrychnykh ta temperaturnykh parametriv vyrobiv, shcho nahrivaiutsia u protsesi kontroliu* [Research of the two-parameter method of control of electrical and temperature parameters of products heated in the control process]. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. – Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. 2 (108), 59 – 67 [in Ukraine].
8. Sebko V. V. (2008). *Vykorystannia teorii teplovoho kontaktного vykhorostrumovoho peretvoriuvacha (KRP), stosovno sumisnoho kontroliu trokh parametriv nemahnitnoi rechovyny* [The use of the theory of the thermal contact pin vortex-current transformer (PVT) with regard to the joint control of the three parameters of the nonmagnetic substance]. Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. – East European Magazine of Advanced Technology. 3/4 (33), 39-43 [in Ukraine].
9. Sebko V. V. (2006). *Opredelenie parametrov ferromagnitnoy zhidkosti s pomoshch'yu kontakt-nogo rabocheho preobrazovatelya KRP* [Determination of parameters of ferromagnetic fluid by means of pin worker of transformer PWT]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiyi politekhnichniy instytut». – Bulletin of the National technical university "Kharkiv polytechnic institute". 44, 15-24.

SEBKO V.

vadim.sebko@gmail.com

*National Technical University "Kharkiv Polytechnic
Institute"*

ZDORENKO V.

alzd123@meta.ua

ORCID: 0000-0001-6508-4290

Kiev National University of Technologies & Design

**БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ТРЕХПАРАМЕТРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО
КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦА
ФЕРРОМАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ
СЕБКО В.В.*, ЗДОРЕНКО В.Г.****

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

**Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Целью статьи является исследование метода трехпараметрового контроля образца ферромагнитной жидкости, реализация которого осуществляется на основе бесконтактного трансформаторного электромагнитного преобразователя (ТЭП) с образцами ферромагнитных жидкостей в продольном магнитном поле.

Методика. Использована методика исследования образцов ферромагнитной жидкости при реализации трехпараметрового электромагнитного метода измерительного контроля физико-химических характеристик ферромагнитных жидкостей на основе теплового ТЭП.

Результаты. Исследован трехпараметровый метод измерительного контроля относительной магнитной проницаемости μ_r , удельной электрической проводимости σ и температуры t образца ферромагнитной жидкости, который контролируется на основании измерений и анализа сигналов теплового бесконтактного трехпараметрового ТЭП.

Научная новизна. Развита теоретическая основа работы бесконтактного теплового ТЭП с образцом ферромагнитной жидкости основанный на реализации трехпараметрового метода измерительного контроля магнитных, электрических и температурных параметров.

Практическая значимость. Реализация предложенного трехпараметрового метода, основанного на бесконтактном тепловом ТЭП осуществляется для пооперационного контроля физико-химических характеристик магнитных жидкостей при их изготовлении и эксплуатации с учетом рациональных критериев качества.

Ключевые слова: ферромагнитная жидкость, физико-химические характеристики, бесконтактный преобразователь, компоненты сигналов, магнитная проницаемость, удельная электрическая проводимость, температура, алгоритм реализации, пооперационный контроль образца, трехпараметровый метод измерительного контроля.

**NON-CONTACT METHOD OF THREE-PARAMETER MEASURING CONTROL OF
PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF A SAMPLE OF A
FERROMAGNETIC LIQUID**

SEBKO V. V. *, ZDORENKO V. G. **

* National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

** Kyiv National University of Technology and Design

Purpose. The aim of the article is to investigate the method of three-parameter control of a sample of a ferromagnetic liquid, the realization of which is carried out on the basis of a noncontact transformer electromagnetic converter (TEC) with samples of ferromagnetic liquids in a longitudinal magnetic field.

Methodology. We used a technique for studying samples of a ferromagnetic liquid for the realization of a three-parameter electromagnetic method for measuring the physical and chemical characteristics of ferromagnetic liquids based on thermal TEC.

Findings. The three-parameter method of measuring control of the relative magnetic permeability μ_r , the specific electrical conductivity σ , and the temperature t of a sample of a ferromagnetic liquid, which is monitored on the basis of measurements and analysis of signals of a thermal contactless three-parameter TEC, is studied.

Originality. The theoretical principles of the operation of a contactless thermal TEC with a sample of a ferromagnetic liquid are based on the realization of a three-parameter method for measuring the monitoring of magnetic, electrical, and temperature parameters.

Practical value. The implementation of the proposed three-parameter method based on the contactless thermal TEC is performed for the operational monitoring of the physical and chemical characteristics of magnetic fluids during their manufacture and operation, taking into account rational quality criteria.

Key words: ferromagnetic liquid, physical and chemical characteristics, contactless converter, signal components, magnetic permeability, specific electric conductivity, temperature, implementation algorithm, sample operating control, three-parameter measurement method.

УДК 621:542.3

СТАЦЕНКО В. В., БІЛА Т. Я., БУРМІСТЕНКОВ О. П.

Київський національний університет технологій та дизайну

АНАЛІЗ РУХУ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ НА ВИХОДІ БУНКЕРІВ

***Мета.** Вивчення впливу фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу на характер його руху на виході бункеру.*

***Методика.** У роботі використані методи математичного моделювання та регресійного аналізу.*

***Результати.** Визначено характерні особливості основних режимів руху матеріалу – нормального та гідравлічного. Наведено математичні моделі руху сипких матеріалів в конічно-циліндричних бункерах, проаналізовано вплив параметрів бункера та частинок на швидкість їх руху. Розроблено стенд та проведені експериментальні дослідження швидкості витікання матеріалів з бункерів, результати яких наведено у роботі.*

***Наукова новизна.** Отримані математичні моделі руху сипких матеріалів у конічних та циліндричних бункерах. Встановлено залежності між фізико-механічними параметрами частинок та швидкістю їх руху.*

***Практична значимість.** Отримані результати дозволяють прогнозувати продуктивність бункерного обладнання для різних видів сипких матеріалів.*

***Ключові слова:** бункер, сипкий матеріал, аналіз руху, моделювання.*

Вступ. У легкій, хімічній та харчовій промисловостях, в сільському господарстві та інших галузях широко використовуються бункерні пристрої для зберігання, перевезення та накопичення сипких матеріалів. В одних випадках сипкі матеріали з бункерів надходять на ваговимірювальні та пакувальні пристрої (зважування та пакування круп, цукру, борошна, тощо), в інших - дозуються та у вигляді окремих компонентів подаються в змішувачі для приготування певних композицій для виробництва різноманітної продукції (плівок, труб, взуття, тощо).

Сучасні підприємства використовують автоматизовані лінії безперервного приготування сипких композицій з подальшим зважуванням і пакуванням або виготовленням виробів, в яких у багатьох випадках бункерні пристрої являються початковою ланкою. До такого обладнання висуваються високі вимоги узгодженості роботи кожного елемента технологічного процесу, а, отже, і до характеру руху сипкого матеріалу від бункера до останньої ланки (змішувача або пакувального агрегату).

Завдання дослідження процесу витікання сипкого матеріалу з бункера є актуальним, не дивлячись на численні роботи в цьому напрямку [1, 2]. Подальше вивчення цього процесу для отримання математичного опису взаємозв'язку структури потоку, сформованого бункером з певними геометричними параметрами, та фізико-механічними властивостями матеріалу дозволить врахувати вплив бункерних пристроїв на загальний технологічний процес та забезпечити умови автоматизації комплексів для безперервного приготування композицій сипких матеріалів.

Постановка завдання. Основним завданням дослідження є вивчення характеру руху сипкого матеріалу з бункера та вплив на нього фізико-механічних властивостей матеріалу та конструктивних параметрів бункера. Для визначення кількісних параметрів процесу

необхідно провести математичне моделювання плинусипкого матеріалу на виході з бункера з урахуванням різних режимів витікання.

Результати та їх обговорення. Бункери є першою ланкою технологічних комплексів для змішування сипких матеріалів. Вони забезпечують зберігання та надходження частинок сипкого матеріалу на вхід живильників та пристроїв дозування. В переважній кількості випадків бункер являє собою ємність із випускним отвором радіусом R , що забезпечує переміщення частинок під дією сил гравітації на вхід наступних пристроїв у технологічному комплексі (рис. 1). Розрізняють [3] два основні режими руху (плинусипкого матеріалу) частинок (рис. 2): нормальний та гідравлічний.

Найчастіше використовують перший режим (нормальний), що має місце в бункерах, із кутом нахилу стінок у рекомендованих межах. За нормальної течії сипкого матеріалу в центральній частині бункера (рис. 2,а) над випускним отвором утворюється потік матеріалу, що складається з частинок, які рухаються вертикально вниз. Біля бічних стінок виникають застійні зони із значно меншою швидкістю частинок, які поступово скочуються у центральну зону. В результаті в центрі поверхні сипкого матеріалу утворюється воронка.

Гідравлічний рух виникає у випадках, коли кут нахилу бічних стінок перевищує деяке граничне значення або коли сипкий матеріал має високу вологість і за властивостями наближається до рідини. При гідравлічному плинусипкого матеріалу рухається у бункері послідовно, шар за шаром, при цьому у верхньому шарі воронка не утворюється. Частинки матеріалу рухаються практично з однаковими швидкостями у всьому об'ємі бункера і поява застійних зон не спостерігається (рис. 2,б).

Нормальний та гідравлічний рухи матеріалу принципово відрізняються, але мають і деякі загальні риси: в першому випадку рух частинок обмежений стінками бункера, а у другому – нерухомими частинками сипкого матеріалу.

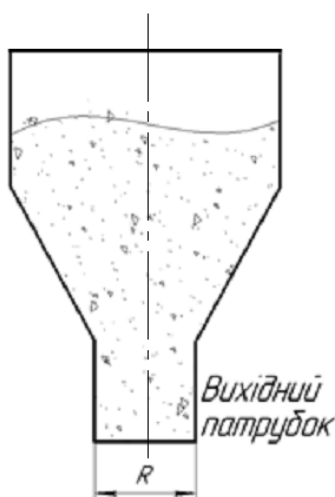
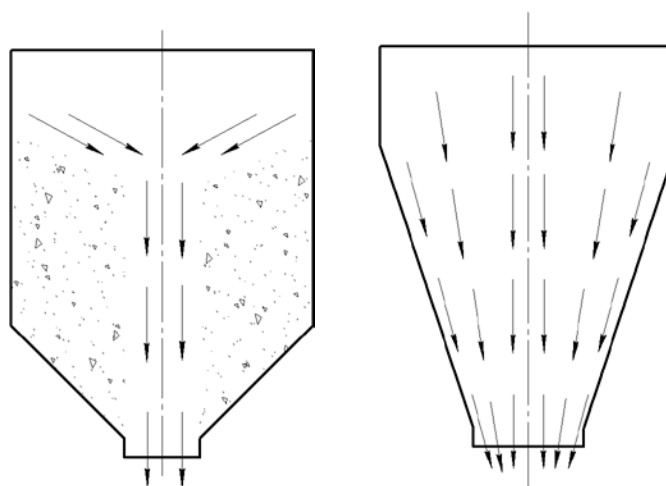


Рис. 1. Розташування матеріалу в бункері



а) нормальний рух

б) гідравлічний рух

Рис. 2. Види руху сипкого матеріалу в бункері

Процес руху частинок залежить від їх фізико-механічних властивостей, геометричних розмірів, форми, зв'язаності частинок та вологості оточуючого середовища. Характерною

особливістю руху сипкого матеріалу є можливість виникнення склепінь, що призводить до переривання потоку матеріалу і, як наслідок, необхідності корегування режимів роботи іншого обладнання технологічного комплексу. Для бункерів найбільш вірогідним є утворення склепінь в зоні випускного отвору. Значно зменшити вірогідність виникнення цього явища можна двома способами: правильним вибором розмірів випускного отвору та використанням спеціальних механічних пристроїв (активаторів). Водночас, збільшення розміру випускного отвору призводить до відповідного збільшення об'ємної продуктивності на виході бункера, а використання активаторів – до виникнення пульсацій у потоці матеріалу.

Таким чином, можна сформулювати основні вимоги до роботи бункерного обладнання:

- забезпечення заданої продуктивності;
- забезпечення мінімальної величини пульсацій потоку матеріалу;
- мінімальне зменшення вірогідності утворення склепінь (уникнення ситуації розриву потоку матеріалу).

Практична реалізація зазначених вимог потребує створення математичної моделі руху частинок на виході бункера, яка б враховувала конструктивні параметри обладнання та властивості частинок сипкого матеріалу.

Відомо декілька підходів [3, 4], що дозволяють визначити швидкість частинок на виході бункера.

У випадку гідравлічного витікання характер руху частинок наближається до характеру плину рідини, що дозволяє з певним наближенням застосовувати закони Торічеллі та Пуазейля.

Відповідно до закону Торічеллі швидкість потоку матеріалу визначається за формулою:

$$v = \lambda \sqrt{2gh}, \quad (1)$$

де g – прискорення вільного падіння, m/c^2 ;

h – висота шару матеріалу в бункері, м;

λ – коефіцієнт витікання (0,55..0,65 для легкосипких матеріалів; 0,3..0,5 для кускових матеріалів неправильної форми; 0,2..0,25 для пилоподібних матеріалів).

Закон Пуазейля дозволяє визначити витрату рідини у трубці, що рухається під дією різниці сил тиску

$$Q(t) = \frac{\pi r^4}{8\eta l} (P2(t) - P1(t)), \quad (2)$$

$P1(t) = 0$ – тиск в нижній точці трубки, Па;

$P2(t)$ – тиск в верхній точці трубки, який визначається рівнем рідини, що знаходиться у ємності (h);

l – довжина трубки, м;

η – коефіцієнт динамічної в'язкості;

r – радіус трубки, м.

У випадку витікання матеріалу з бункера різниця тисків визначається кількістю матеріалу, що знаходиться над вихідним отвором. Отже, і при використанні закону

Торічеллі, і при використанні закону Пуазейля, швидкість потоку залежить від величини рівня матеріалу над випускним отвором.

Для визначення характеру руху потоку складемо рівняння балансу матеріалу:

$$Q(t) = \frac{dV(t)}{dt} \quad (3)$$

де V – об’єм матеріалу в бункері.

Враховуючи, що бункер в більшості випадків має циліндричну та конічну частини, складемо диференціальні рівняння для кожної з таких ємностей (рис. 3, 4).

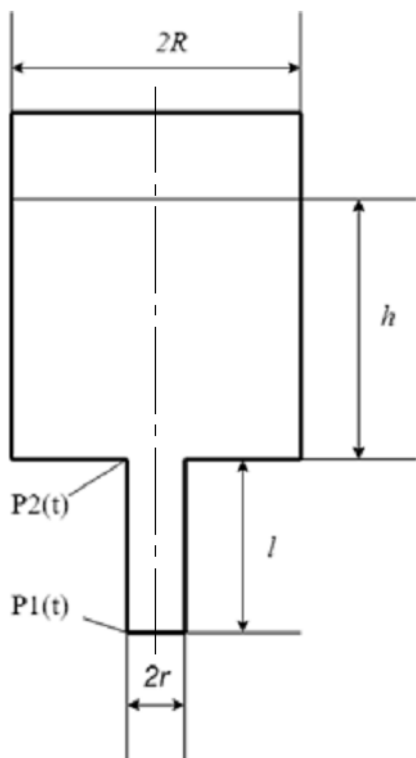


Рис.3. Бункер циліндричної форми

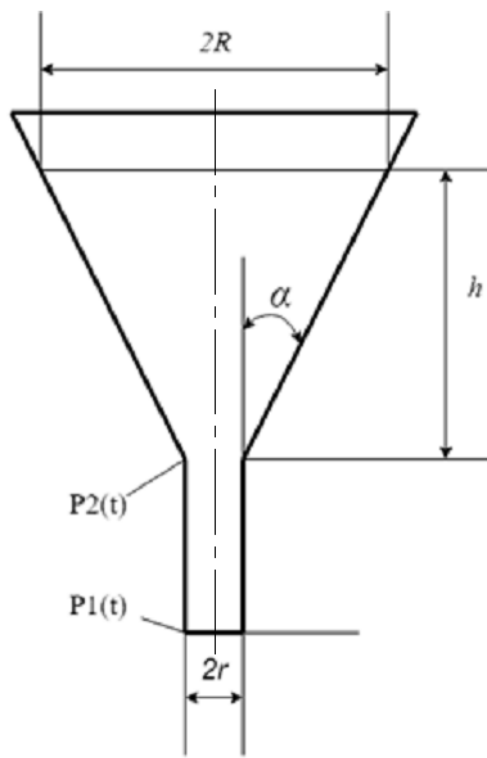


Рис.4. Бункер конічної форми

Для циліндричної ємності рівняння приймає вигляд:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{\pi r^4}{8\eta l} P2(t) = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \rho g h(t) = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \rho g \frac{V(t)}{\pi R^2} \quad (4)$$

Його розв’язком є експоненціальна залежність, що показана на рис. 5 наступному рисунку.

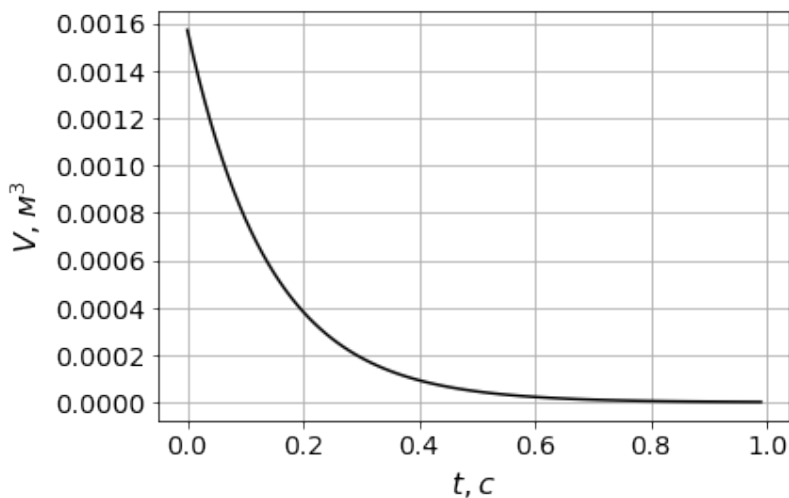


Рис.5. Зміна об'єму матеріалу в бункері циліндричної форми

У випадку усіченого конуса необхідно врахувати, що його поперечний перетин є змінною величиною. Для цього запишемо формулу для визначення об'єму усіченого конуса:

$$V(t) = \frac{1}{3}\pi h(r^2 + rR(t) + R(t)^2) \quad (5)$$

де $R = tg\alpha h + r$

Відповідно, диференціальне рівняння приймає вигляд:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \rho g h(t) \quad (6)$$

де $h(t)$ визначається як розв'язок наступного рівняння

$$\pi tg^2\alpha h^3 + 3\pi tg\alpha r h^2 + 3\pi r^2 h - 3V = 0 \quad (7)$$

В цьому випадку характер витрати матеріалу наближається до лінійного.

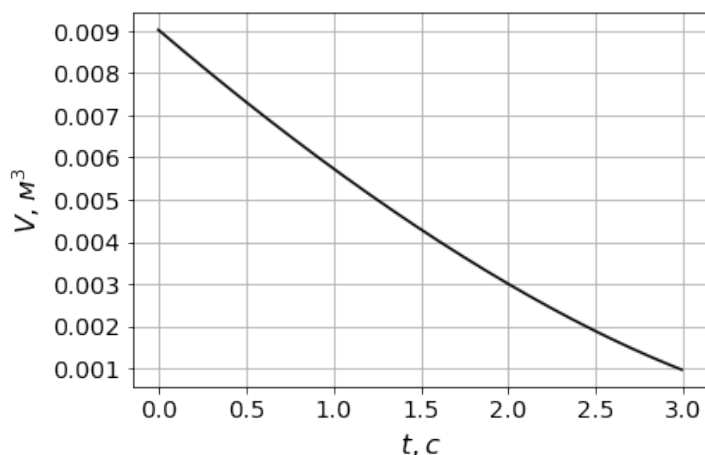


Рис.6. Зміна об'єму матеріалу в бункері конічної форми

Також відома [3] формула, що дозволяє визначити швидкість у випадку нормального витікання:

$$v = \lambda \sqrt{3,2gR}, \quad (8)$$

де R – гідравлічний радіус отвору, м.

В цьому випадку вплив параметрів сипкого матеріалу враховується коефіцієнтом λ , а гідравлічний радіус отвору бункера враховує діаметр отвору та розмір частинок матеріалу. Для отвору у вигляді кола його можна визначити за формулою:

$$R = \frac{D-a}{4}, \quad (9)$$

де a – розмір частинки, D – діаметр отвору бункера.

Враховуючи, що рівняння балансу матеріалу (3) залишається незмінним, для випадку нормальної течії отримаємо диференціальне рівняння у вигляді:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \pi R^2 v = \pi R^2 \lambda \sqrt{3,2gR}. \quad (10)$$

Всі величини у правій частині рівняння є сталими та не залежать від часу. Таким чином, розв'язком рівняння буде лінійна залежність:

$$\int_0^t dV = \pi R^2 \lambda \sqrt{3,2gR} \int_0^t dt, \quad (11)$$

$$V = \pi R^2 \lambda \sqrt{3,2gR} t. \quad (12)$$

Відповідно, вираз для визначення часу витікання заданої кількості матеріалу з бункера можна записати у наступному вигляді:

$$t_{max} = \frac{m}{\pi R^2 \lambda \sqrt{3,2gR} \rho}, \quad (13)$$

де m – маса матеріалу в бункері;

ρ – насипна густина матеріалу.

Всі наведені співвідношення є емпіричними і враховують параметри сипкого матеріалу у вигляді узагальнюючих коефіцієнтів (λ , R). На практиці характер взаємодії частинок залежить як від їх геометричних розмірів та властивостей, так і від вологості оточуючого середовища.

Отримані аналітичні залежності дозволяють висунути гіпотезу, що під час витікання сипкого матеріалу з бункера будуть проявлятися як властивості, що характерні для рідини, так і властивості, характерні для ідеального сипкого матеріалу.

Для перевірки гіпотези проведені експериментальні дослідження відповідно наступної послідовності.

1) У бункер із закритим вихідним отвором завантажувалась задана кількість сипкого матеріалу.

2) Під вихідним отвором бункера була розташована ємність із датчиком маси, який був під'єднаний через АЦП до мікроконтролера.

3) Відкривався вихідний отвір бункера, сипкий матеріал потрапляв у ємність, а мікроконтролер зчитував сигнал датчика маси через задані проміжки часу.

4) Дослід повторювався по десять разів для трьох різних матеріалів і двох бункерів різної форми.

У таблиці 1 наведені параметри сипких матеріалів, що досліджувались.

Таблиця 1

Параметри сипких матеріалів

	Матеріал 1	Матеріал 2	Матеріал 3
Розмір частинки, мм	2,9 – 3,8	~1,7	~2,2
Кут природнього укусу, град	35,0	41,9	30,7
Насипна густина, кг/м ³	815	770	850

Аналіз результатів досліджень (рис. 7,8,9) свідчить, що залежність між масою матеріалу, який витік з бункера, та часом, є лінійною. Тобто для її апроксимації можна використати лінійне рівняння регресії.

Точками на графіках показані експериментальні дані, суцільними лініями – результати розрахунків за отриманими рівнянням регресії.

Матеріал 1. Рівняння регресії:

$$m = 0,0986t + 12,037. \quad (14)$$

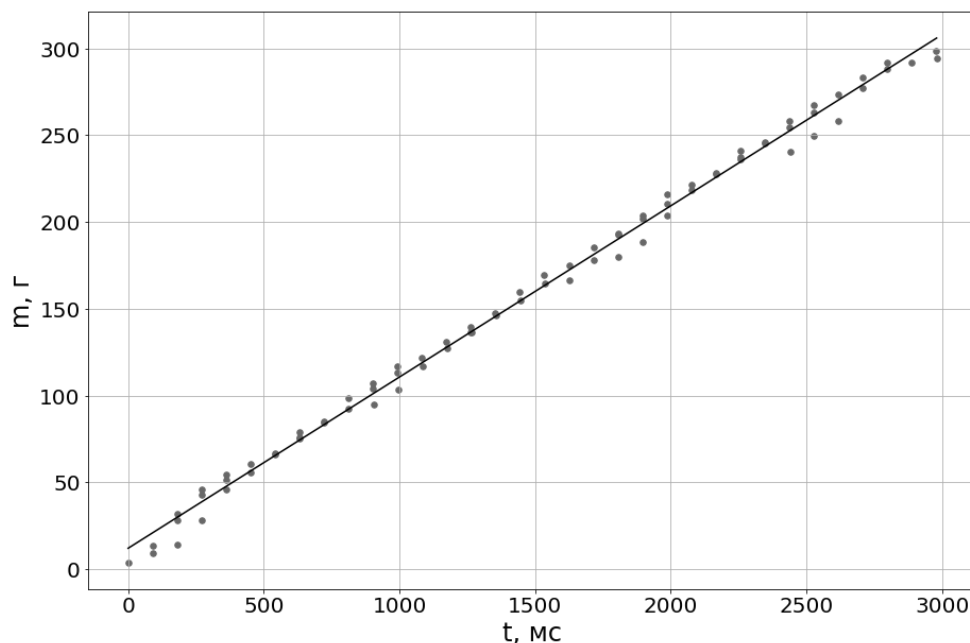


Рис.7. Зміна маси матеріалу 1, який витік з бункера, у часі

Матеріал 2. Рівняння регресії:

$$m = 0,0894t + 12,954. \quad (15)$$

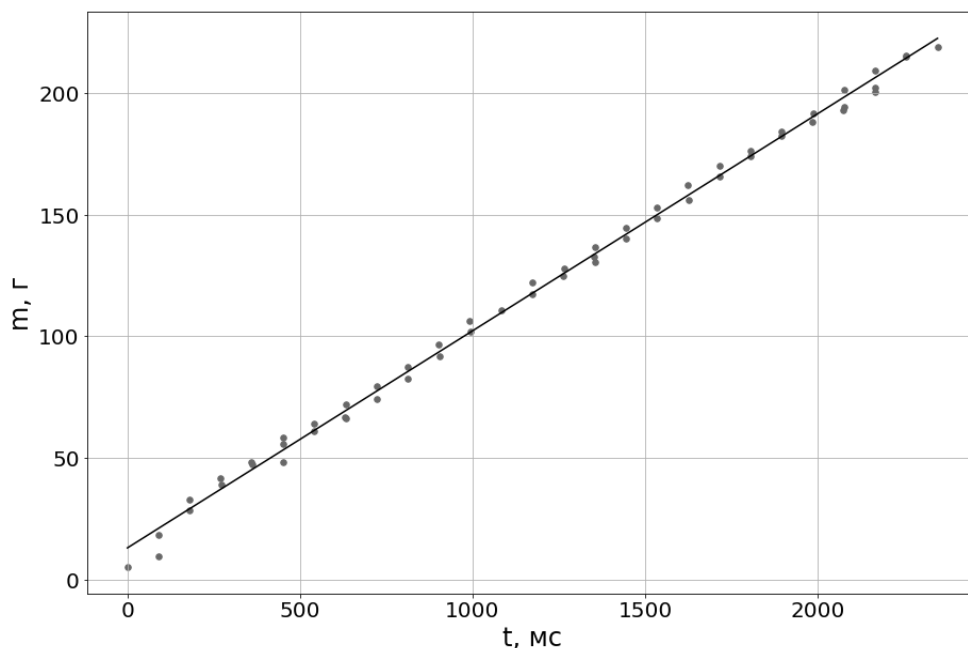


Рис.8. Зміна маси матеріалу 2, який витік з бункера, у часі

Матеріал 3. Рівняння регресії:

$$m = 0,111t - 1,841. \quad (16)$$

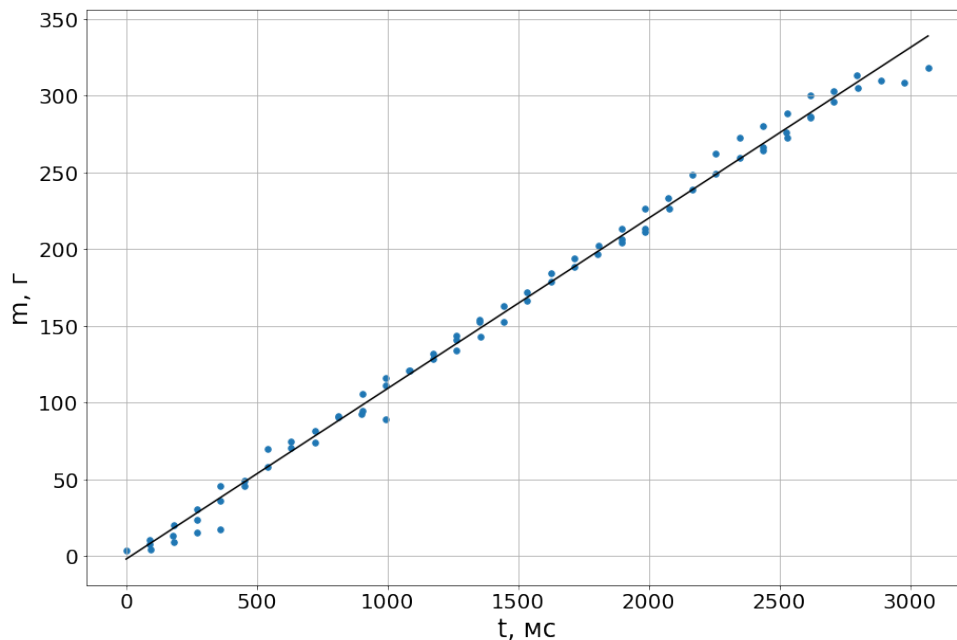


Рис.9. Зміна маси матеріалу 3, який витік з бункера, у часі

У таблиці 2 наведено швидкість витікання матеріалів з бункера.

Таблиця 2

Швидкість витікання матеріалів з бункера

	Матеріал 1	Матеріал 2	Матеріал 3
Швидкість витікання, кг/с	0,0986	0,0784	0,0894

Для визначення взаємозв'язку між параметрами сипких матеріалів та швидкістю потоку, розрахуємо коефіцієнти кореляції (Пірсона) між:

- швидкістю потоку та кутом природнього укосу;
- швидкістю потоку та розміром частинок;
- швидкістю потоку та насипною густиною.

Коефіцієнт кореляції Пірсона характеризує існування лінійної залежності між двома величинами (x, y) та визначається за формулою:

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (17)$$

де \bar{x}, \bar{y} – вибіркові середні.

Результати розрахунків:

- 1) Коефіцієнт кореляції між швидкістю потоку та насипною густиною $r_\rho = 0,603$.
- 2) Коефіцієнт кореляції між швидкістю потоку та кутом природнього укосу $r_\varphi = 0,65$.
- 3) Коефіцієнт кореляції між швидкістю потоку та розміром частинок $r_a = 0,962$.

Перевіримо взаємозв'язок між отриманими експериментальними даними та рівнянням (8).

Визначаємо гідравлічний радіус отвору для всіх трьох матеріалів (9) та розраховуємо швидкість матеріалу на виході з бункера (8) таблиця 3.

Таблиця 3

Швидкість матеріалу на виході з бункера

	Гідравлічний радіус, м	Швидкість матеріалу, м/с
Матеріал 1	0,0044	0,2232
Матеріал 2	0,0048	0,2334
Матеріал 3	0,0047	0,2303

Розраховуємо коефіцієнт кореляції між швидкостями руху матеріалу, які отримані експериментально, і визначені за рівнянням (8):

$$r_v = -0,961$$

Коефіцієнт кореляції, що дорівнює 0,961 свідчить, що при моделюванні руху сипкого матеріалу з бункера, можна використовувати нормальний закон плинуща середовища, який і визначатиме продуктивність бункера.

Висновки:

- 1) За нормальної течії сипкого матеріалу його швидкість на виході бункера є сталою та не залежить від кількості матеріалу в бункері.
- 2) Існує лінійна залежність між розміром частинок матеріалу та швидкістю його руху ($r_a = 0,962$).
- 3) Насипна густина та кут природнього укосу меншою мірою впливають на швидкість руху матеріалу ($r_p = 0,603, r_\varphi = 0,65$).

Література

1. Гячев Л. В. Основы теории бункеров и силосов. – Барнаул: АПИ, 1986. – 84с.
2. Стаценко В. В. Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів: монографія / В.В. Стаценко, О.П. Бурмістенков, Т.Я. Біла. – Київ: КНУТД, 2017. – 220с.
3. Глобин А. Н. Дозаторы: монографія / А. Н. Глобин, И. Н. Краснов. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 384с.
4. Stanley Middleman. An Introduction to Fluid Dynamics: Principles of Analysis and Design: John Wiley & Sons, 1997. – 528р.

References

1. Hyachev L. (1986). Osnovy teoryy bunkerov y sylosov [Bunkers and silos theory fundamentals]. Barnaul: APY. [in Russian].
2. Statsenko V. V., Burmistenkov O. P., Bila T. Y. (2017). Avtomatyzovani kompleksi bezperernvoho pryhotuvannya kompozycij sypkyykh materialiv: monohrafiya [Automated complexes for bulk material compositions continuous preparation]. Kyuyiv: KNUTD [in Ukrainian].
3. Hlobyn A. N., Krasnov Y. N. (2016). Dozatory: monohrafiya [Dosers]. M.-Berlyn: Dyrekt-Medya. [in Russian].
4. Stanley Middleman. (1997). An Introduction to Fluid Dynamics: Principles of Analysis and Design: John Wiley & Sons. [in English]

STATSENKO V. V

statsenko.v@knutd.edu.ua

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

Researcher ID: C-3646-2017

Kiev National University of Technologies & Design

BURMISTENKOV O. P

burmistenkov.op@knutd.edu.ua ORCID:

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

Researcher ID: T-5180-2018

Kiev National University of Technologies & Design

BILA T. Y.

bila.ty@knutd.edu.ua

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

Researcher ID: T-5276-2018

Kiev National University of Technologies & Design

**АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ВЫХОДЕ БУНКЕРОВ
СТАЦЕНКО В. В., БУРМИСТЕНКОВ А. П., БЕЛАЯ Т. Я.**

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Изучение влияния физико-механических свойств сыпучего материала на характер его движения на выходе бункера.

Методика. В работе использованы методы математического моделирования и регрессионного анализа.

Результаты. Определены характерные особенности основных режимов движения материала - нормального и гидравлического. Приведены математические модели движения сыпучих материалов в конически-цилиндрических бункерах, проанализировано влияние параметров бункера и

частиц на скорость их движения. Разработан стенд и проведены экспериментальные исследования скорости истечения материалов из бункеров, результаты которых представлены в работе.

Научная новизна. Получены математические модели движения сыпучих материалов в конических и цилиндрических бункерах. Установлены зависимости между физико-механическими параметрами частиц и скоростью их движения.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют прогнозировать производительность бункерного оборудования для различных видов сыпучих материалов.

Ключевые слова: бункер, сыпучий материал, анализ движения, моделирование.

THE BULK MATERIALS MOVEMENT ANALYSIS AT THE BUNKERS OUTLET

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

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. The study of the bulk material physics and mechanical properties influence on the its movement nature at the bunker outlet.

Methodology. We used the mathematical modeling and regression analysis methods.

Findings. The characteristic features of the material main movement modes (normal and hydraulic) are defined. Mathematical models of the bulk materials movement in conical-cylindrical bunkers are given, the bunker and particles parameters influence on their velocity is analyzed. An equipment was developed and experimental studies of the materials discharge rate from bunkers were carried out, the results are presented in the work.

Originality. Mathematical models of the bulk materials movement in conical and cylindrical bunkers are obtained. The dependences between the particles physic-mechanical parameters and their movement speed are established.

Practical value. The results obtained allow us to predict the bunker equipment performance of for various bulk materials types.

Keywords: bunker, bulk material, motion analysis, modeling.

УДК 621.315.2.016.2

ЛОБОДЗИНСЬКИЙ В. Ю., ЧИБЕЛІС В. І.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТРИФАЗНОЇ ЛІНІЇ З
РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРИ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСАХ**

Мета. Розроблення математичної моделі трифазної лінії з розподіленими параметрами при електромагнітних перехідних процесах, які виникають при різних комутаціях для розрахунку перехідних режимів на стадії проектування.

Методика. В основу роботи покладені диференційні рівняння стану кола, граничні та початкові умови для забезпечення рішення практичних задач.

Результати. Розроблена математична модель для розрахунку електромагнітних перехідних процесів у трифазних лініях, яка включає систему диференційних рівнянь у часткових похідних, граничні та початкові умови, для дослідження широкого класу практичних завдань, пов'язаних з розрахунком перехідних процесів у трифазних лініях.

Наукова новизна. Побудована математична модель трифазного кола з розподіленими параметрами, яка придатна для розрахунку перехідних електромагнітних процесів, які враховують можливі варіанти комутацій, як робочого так і аварійного характеру.

Практична значимість. Отримано операторні зображення струмів та напруг з урахуванням початкових умов для вирішення практичних задач пов'язаних з розрахунком перехідних процесів в трифазних лініях.

Ключові слова: *перехідні процеси, операторний метод, математична модель, розподіленні параметри.*

Вступ. Для дослідження електромагнітних перехідних процесів в трифазних кабельних лініях надається першочергове значення з точки зору їх аналізу, розробки, проектування та експлуатації при функціонуванні в нормальних та аварійних режимах роботи [1-5].

Надійність роботи кабельних ліній електропередачі визначається високими технічними характеристиками, на основі яких виконана лінія, а також умовами її експлуатації. Актуальність розрахунку електромагнітних перехідних процесів пов'язано з вибором конструктивного виконання лінії та засобів захисту в аварійних режимах роботи від перенапруг та струмів короткого замикання. Тому потрібно розробляти та удосконалювати методики чисельного розрахунку перехідних процесів у трифазних лініях з розподіленими параметрами та складними початковими умовами пр. різних комутаціях [6-9].

Для дослідження електромагнітних перехідних процесів використовуються схеми заміщення елемента dx лінії з розподіленими параметрами (рис. 1). При цьому модель кабельної лінії стає аналогічною відомим математичним моделям довгих ліній [10].

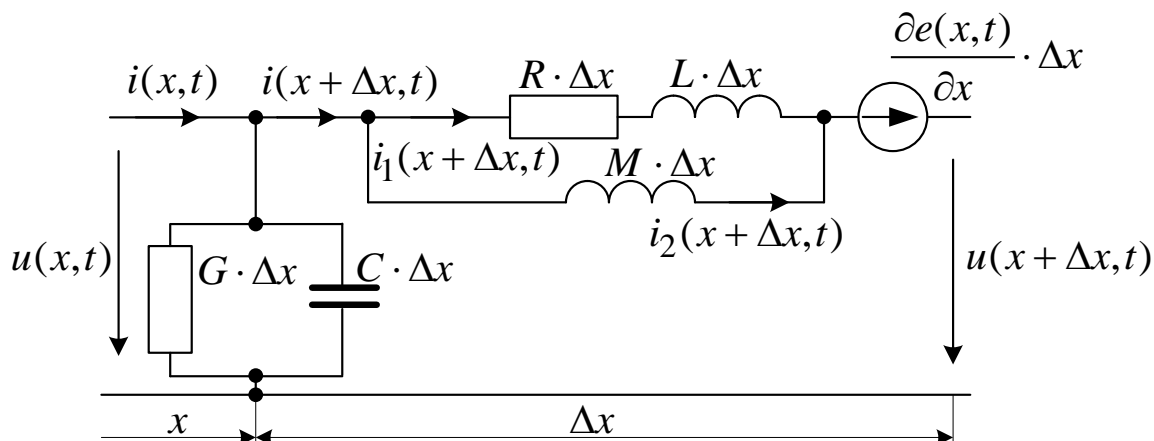


Рис. 1. Узагальнена схема заміщення однієї фази трифазної лінії

Так як в конструкції кабелю передбачено наявність додаткового екрану для вирівнювання електричного поля, то при описі процесів в схемі заміщення з розподіленими параметрами для однофазного кабелю слід враховувати взаємодію M , яка визначається електромагнітним полем в ізоляції між жилою та екраном.

Фізичний сенс елементів схеми заміщення (рис.1) полягає в наступному: L (Гн/м) – середнє значення ефективної індуктивності кабелю з урахуванням взаємної індукції між елементами кабелю, на одиницю довжини; R (Ом/м) – активний опір на одиницю довжини, еквівалентний поздовжнім первинним параметрам лінії; C (Ф/м) – середнє значення ємності щодо провідників і землі, на одиницю довжини; G (См/м) – провідність на одиницю довжини лінії, еквівалентна діелектричним втратам в ізоляції; M (Гн/м) – середнє значення поздовжньої взаємної індуктивності між жилою та екраном.

Постановка завдання. Побудова математичної моделі трифазної лінії з розподіленими параметрами, для отримання операторних зображень напруг та струмів, які дозволяють досліджувати електромагнітні перехідні процеси у трифазних лініях електропередачі на стадії проектування по конструктивних даних кола з урахуванням його параметрів.

Результати дослідження. Побудуємо математичну модель електромагнітних перехідних процесів у трифазних лініях з розподіленими параметрами, яка складається із системи диференційних рівнянь стану кола, граничних та початкових умов. При математичному описанні поставлених задач виникають зміщанні крайові задачі. Для отримання перехідних зображень напруг та струмів використовується операторний метод. Для вирішення поставлених задач скористаємось низькою припущень: диференційні рівняння лінійні та після комутаційні граничні умови виникають миттєво.

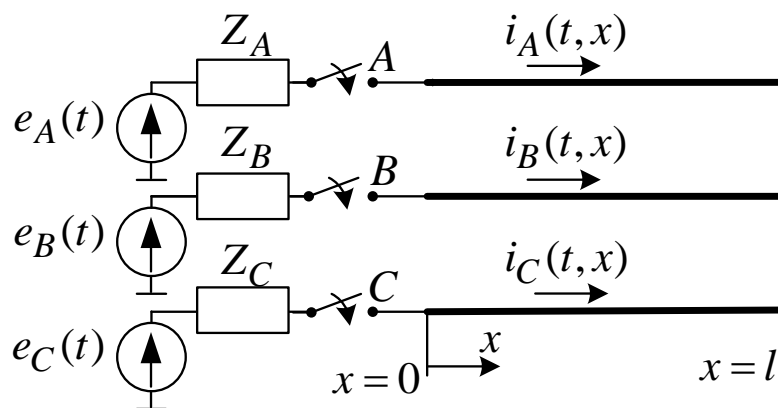


Рис.2. Система координат струмів у трифазній лінії

Розглянемо після комутаційний стан трифазної лінії (рис. 2). Запишемо граничні умови в операторній формі (по Лапласу):

Підключення лінії до навантаження з урахуванням рівності потенціалів у вузлах A, B, C

$$U_A(l, p) = U_B(l, p) = U_C(l, p)$$

для струмів

$$I_A(l, p) + I_B(l, p) + I_C(l, p) = 0$$

Крім того, для вузлів записується потенціал щодо землі через ЕРС генератора і падіння напруги в опорі $Z_A(p) = Z_B(p) = Z_C(p) = Z(p)$

$$U_A(0, p) = I_A(0, p) \cdot Z(p) + E_A(p)$$

$$U_B(0, p) = I_B(0, p) \cdot Z(p) + E_B(p)$$

$$U_C(0, p) = I_C(0, p) \cdot Z(p) + E_C(p)$$

де $Z(p)$ – опір навантаження генератора.

Початкові умови, необхідні при розрахунку перехідних процесів, знайдемо, розглянувши стаціонарний режим до комутації. Загальні рівняння, які записані на підставі законів Кірхгофа для схеми заміщення (рис.1) приводяться до однорідного виду відносно змінних $u(x, t)$ та $i(x, t)$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} &= R \cdot i(x, t) + L \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} - R \cdot M \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x \partial t} - L \cdot M \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x \partial t} \\ \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} &= G \cdot u(x, t) + C \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

Стаціонарне рішення рівнянь (1), справедливі для кожної фази. Для фази A , знайдемо у вигляді:

$$u_A(x,t) = a_1(x) \sin(\omega t) + a_2(x) \cos(\omega t), \quad i_A(x,t) = \alpha_1(x) \sin(\omega t) + \alpha_2(x) \cos(\omega t) \quad (2)$$

Далі підставляємо (2) в (1), що приводить до однорідної системи рівнянь (для фази A):

$$\begin{aligned} (1-LM\omega^2)a_1' & -RM\omega a_2' & -R\alpha_1 & +\omega L\alpha_2 & = 0 \\ RM\omega a_1' & +(1-LM\omega^2)a_2' & -\omega L\alpha_1 & -R\alpha_2 & = 0 \\ -Ga_1 & +\omega Ca_2 & +\alpha_1 & & = 0 \\ -\omega Ca_1 & -Ga_2 & & +\alpha_2 & = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Для існування нетривіального рішення необхідно визначник системи прирівняти до нуля, з якого характеристичні знаходимо корені $p_1 = -p_3, p_2 = -p_4$.

Рішення системи (3) запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} a_1 & = X_{11} \operatorname{ch} p_1 x + X_{12} \operatorname{sh} p_1 x + X_{13} \operatorname{ch} p_2 x + X_{14} \operatorname{sh} p_2 x \\ a_2 & = X_{21} \operatorname{ch} p_1 x + X_{22} \operatorname{sh} p_1 x + X_{23} \operatorname{ch} p_2 x + X_{24} \operatorname{sh} p_2 x \\ \alpha_1 & = X_{31} \operatorname{ch} p_1 x + X_{32} \operatorname{sh} p_1 x + X_{33} \operatorname{ch} p_2 x + X_{34} \operatorname{sh} p_2 x \\ \alpha_2 & = X_{41} \operatorname{ch} p_1 x + X_{42} \operatorname{sh} p_1 x + X_{43} \operatorname{ch} p_2 x + X_{44} \operatorname{sh} p_2 x \end{aligned} \quad (4)$$

Із системи (3) відкидаємо перше рівняння (так як визначник $\Delta_p=0$), інші рівняння пов'язують дванадцять із шістнадцяти коефіцієнтів X_{ij} у рішенні (4). Підставивши (4) у друге, третє та четверте рівняння системи (3) та прирівнюємо до нуля коефіцієнти $\operatorname{ch} p_1 x, \operatorname{sh} p_1 x, \operatorname{ch} p_2 x, \operatorname{sh} p_2 x$. В загальному рішенні для однієї фази залишається чотири вільних невідомих, а у всіх трьох фазах – дванадцять. Для замикання системи рівнянь слід використовувати шість граничних умов, кожне з яких розщеплюється на два – по $\sin \omega t$ та $\cos \omega t$ аналогічно тому, як це було зроблено при отриманні системи (3). Отримуємо рівняння, які пов'язують невідомі числа X_{ij} для фази A, при $j=1..4$:

$$\begin{aligned} RM\omega p_{1,2} X_{1j} + (1-LM\omega^2) p_{1,2} X_{2j} - \omega L X_{3j} - R X_{4j} & = 0 \\ -G X_{1j} - \omega C X_{2j} + p_{1,2} X_{3j} & = 0 \\ -\omega C X_{1j} - G X_{2j} + p_{1,2} X_{4j} & = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Всі три групи рівнянь (5) об'єднуються в одну систему з дванадцяти рівнянь, яку отримаємо із граничних умов для стаціонарного докмутаційного режиму.

При відомих хвильових параметрах R, L, G, C, M фази і з урахуванням знайдених характеристичних коренів $p_1 = -p_3, p_2 = -p_4$, зі спільного рішення системи рівнянь 48×48 визначаються всі числа X_{ij} . Ця система рівнянь будується з чотирьох підсистем:

- трьох універсальних (5), однакових для всіх видів комутації;
- одного індивідуального для кожної схеми комутації.

Після визначення чисел X_{ij} . Можна записати остаточний вигляд стаціонарних функцій напруги та струму. Для активного трифазного кола (фаза A):

$$u_A(x,t) = [X_{11} \operatorname{ch} p_1 x + X_{12} \operatorname{sh} p_1 x + X_{13} \operatorname{ch} p_2 x + X_{14} \operatorname{ch} p_2 x] \sin \omega t + \\ + [X_{21} \operatorname{ch} p_1 x + X_{22} \operatorname{sh} p_1 x + X_{23} \operatorname{ch} p_2 x + X_{24} \operatorname{ch} p_2 x] \cos \omega t, \\ i_A(x,t) = [X_{31} \operatorname{ch} p_1 x + X_{32} \operatorname{sh} p_1 x + X_{33} \operatorname{ch} p_2 x + X_{34} \operatorname{ch} p_2 x] \sin \omega t + \\ + [X_{41} \operatorname{ch} p_1 x + X_{42} \operatorname{sh} p_1 x + X_{43} \operatorname{ch} p_2 x + X_{44} \operatorname{ch} p_2 x] \cos \omega t + \\ + I_1 \sin \omega t + I_2 \cos \omega t,$$

Висновок. Розроблена математична модель електромагнітних перехідних процесів у трифазних лініях з розподіленими параметрами, яка включає в себе систему диференціальних рівнянь у часткових похідних, граничні та початкові умови, яка придатна для дослідження широкого класу практичних задач, які пов'язані з розрахунком перехідних процесів у трифазних повітряних та кабельних лініях.

Література

1. Волновые явления в неоднородных линиях: В 5 т. Том 4. Параметрические цепи / В. К. Римский, В. П. Берзан, В. И. Пацюк, Н. Ф. Карчева, И. В. Андрос; Типография Академии наук Молдовы. – Кишинев, 2008. – 560 с.
2. Кадомская К. П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: учебник / К. П. Кадомская, Ю. А. Лавров, А.А. Рейхердт; Изд-во НГТУ. – Новосибирск, 2004. – 320 с.
3. Костенко М. В. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения / М. В. Костенко, К. П. Кадомская, М. Л. Левинштейн, И. А. Ефремов. – Л.: Наука, 1988. – 302 с.
4. Левинштейн М. Л. Операционное исчисление в задачах электротехники / М.Л. Левинштейн – 2-е изд.– Л.: Энергия, 1972. – 360 с.
5. Chibelis V. Research of transposition efficiency of screens of three-phase cable lines, taking into account the mutual disposition of phase / Chibelis V., Lobodzinskiy V., Illina O. // Computational problems of electrical engineering. – Lviv. Vol. 6, No.2, 2016. – pp. 63-66.
6. Lobodzinskiy V. The Investigation of Wave Process During Propagation of Plate Voltage Pulse on Three-Phase Performance Cable Line. / Lobodzinskiy V., Tsyban Y. // IEEE Electrical and computer engineering (UKRCON) –2017. – pp. 448-452.
7. Лободзинський В. Ю. Дослідження форм кривих перехідного процесу при комутаціях

References

1. Rimskiy, V. K., Berzan, V. P., Patsyuk, V. I., Karcheva, N. F. & Andros, I. V. (2008). *Volnovye yavleniya v neodnorodnykh liniyakh. Parametricheskie tsepi* [Wave phenomena in inhomogeneous lines. Parametric circuits]. Tipografiya Akademii nauk Moldovy. (Vols. 1-5; Vol. 4). Kishinev. [in Russian].
2. Kadomskaya, K. P., Lavrov, Yu. A. & Reykherdt, A. A. (2004) *Perenapryazheniya v elektricheskikh setyakh razlichnogo naznacheniya i zashchita ot nikh* [Overvoltages in electrical networks for various purposes and protection from them]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU [in Russian].
3. Kostenko, M. V., Kadomskaya, K. P., Levinshteyn, M. L. & Efremov, I. A. (1988) *Perenapryazheniya i zashchita ot nikh v vozdushnykh i kabel'nykh elektroperedachakh visokogo napryazheniya* [Overvoltages and protection from them in overhead and cable transmissions of high voltage]. Lviv: Nauka [in Russian].
4. Levinshteyn, M. L. (1972) *Operatsionnoe ischislenie v zadachakh elektrotehniki* [Operational calculus in electrical engineering problems]. (2d ed.). Lviv: Energiya [in Russian].
5. Chibelis V. Research of transposition efficiency of screens of three-phase cable lines, taking into account the mutual disposition of phase / Chibelis V., Lobodzinskiy V., Illina O. // Computational problems of electrical engineering. – Lviv. Vol. 6, No.2, 2016. – pp. 63-66.
6. Lobodzinskiy V. The Investigation of Wave Process During Propagation of Plate Voltage Pulse on Three-Phase Performance Cable Line. / Lobodzinskiy V., Tsyban Y. // IEEE Electrical and computer engineering (UKRCON) –2017. – pp. 448-452.
7. Lobodzynskiy, V. Yu. (2017). *Doslidzhennia form kryvykh perekhidnoho protsesu pry komutatsiyakh*

[Текст] / В. Ю. Лободзинський // Праці інституту електродинаміки НАН України. – 2017. – №47. – С.11-15.
8. Лободзинський В. Ю. Аналіз перенапруг та струмів однорідної довгої лінії при несиметричних коротких замиканнях [Текст] / В. Ю. Лободзинський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. – 2017. - № 2 (108). - С. 38-44.
9. Lobodzinskiy V. Mathematical modeling of the three-phase high-voltage cable lines under the theory of multiterminal networks / V. Lobodzinskiy, L. Maslak // IEEE Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE) – 2015. – pp. 96-98.
10. Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Т.3. / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин; СПб.: Питер. – Санкт-Петербург, 2003. — 377 с.

[Investigation of the forms of the curves of the transient process during commutation]. *Pratsi instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy, 47, 11-15* [in Ukraine].
8. Lobodzynskiy V. Yu. (2017) *Analiz perenapruh ta strumiv odnorodnoi dovroi linii pry nesymetrychnykh korotkykh zamykanniakh* [Analysis of overvoltages and currents of a homogeneous long line with asymmetrical short circuits]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Serii Tekhnichni nauky, 2(108), 38-44* [in Ukraine].
9. Lobodzinskiy V. Mathematical modeling of the three-phase high-voltage cable lines under the theory of multiterminal networks / V. Lobodzinskiy, L. Maslak // IEEE Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE) – 2015. – pp. 96-98.
10. Demirchyan, K. S., Neyman, L. R., Korovkin, N. V. & Chechurin, V. L. (2003) *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. SPb.: Piter. (Vols. 1-3; Vol. 3). St. Petersburg [in Russian].

LOBODZINSKIY VADIM

vadim_lv@bigmir.net

ORCID: 0000-0003-1167-824X

Researcher ID: 57188750413

Department of Theoretical Grounds of Electrical Engineering

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

CHYBELIS VALERY

toe209@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2235-9826>

Researcher ID: 57195586866

Department of Theoretical Grounds of Electrical Engineering

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНИИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ ЛОБОДЗИНСКИЙ В. Ю., ЧИБЕЛИС В. И.

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

Цель. Разработка математической модели трехфазной линии с распределенными параметрами при электромагнитных переходных процессах, возникающих при различных коммутациях для расчета переходных режимов на стадии проектирования.

Методика. В основу работы положены дифференциальные уравнения состояния цепи, предельные и начальные условия для обеспечения решения практических задач.

Результаты. Разработана математическая модель для расчета электромагнитных переходных процессов в трехфазных линиях, которая включает систему дифференциальных уравнений в частных производных, предельные и начальные условия, для исследования широкого класса практических задач, связанных с расчетом переходных процессов в трехфазных линиях.

Научная новизна. Построена математическая модель трехфазного цепи с распределенными параметрами, которая пригодна для расчета переходных электромагнитных процессов, которые учитывают возможные варианты коммутаций, как рабочего, так и аварийного характера.

Практическая значимость. Получено операторные изображения токов и напряжений с учетом начальных условий для решения практических задач связанных с расчетом переходных процессов в трехфазных линиях.

Ключевые слова: переходные процессы, операторный метод, математическая модель, распределенные параметры.

MATHEMATICAL MODEL OF THREE-PHASE LINE WITH DISTRIBUTED PARAMETERS AT ELECTROMAGNETIC TRANSITION PROCESSES

LOBODZINSKIY V.U., CHIBELIS V. I.

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

Purpose. Development of a mathematical model of a three-phase line with distributed parameters at electromagnetic transients, which arise at different commutations for the calculation of transition modes at the design stage.

Methodology. The work is based on differential equations of chain state, limiting and initial conditions for ensuring the solution of practical problems.

Findings. A mathematical model has been developed for the calculation of electromagnetic transients in three-phase lines, which includes a system of partial differential equations, limit and initial conditions, for the study of a wide class of practical problems related to the calculation of transients in three-phase lines.

Originality. A mathematical model of a three-phase circuit with distributed parameters has been built, which is suitable for the calculation of transient electromagnetic processes, which take into account possible switching options, both working and emergency ones.

Practical value. Operator images of currents and voltages were obtained taking into account the initial conditions for solving practical problems associated with the calculation of transients in three-phase lines.

Key words: transients, operator method, mathematical model, distributed parameters.

УДК 621.316.1

КУЛИК В. В. *, БУРИКІН О. Б. *, ПІРНЯК В. М. **

*Вінницький національний технічний університет,

**ТОВ «Подільський енергоконсалтинг»

КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВСТАНОВЛЕННЯ ДОДАТКОВИХ ДЖЕРЕЛ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Мета. Розроблення методу комплексного оцінювання ефективності встановлення джерел реактивної потужності (ДРП) в електричних мережах.

Методика. Показник ефективності отримано шляхом поєднання методу оцінювання якості функціонування електромереж на основі мереж Маркова та методу інтервального аналізу втрат електроенергії.

Результати. Розроблений показник дозволяє вдосконалити постановку задачі оптимізації розміщення ДРП в електричних мережах та підвищити якість її розв'язання.

Наукова новизна. Запропоновано метод формування показника гарантованої ефективності впровадження КРП, який забезпечує її однозначне комплексне оцінювання з урахуванням надійності електромережі, якості напруги у її вузлах, а також точності визначення відпуску та втрат електроенергії.

Практична значимість. Алгоритми оптимізації розміщення ДРП, що побудовані на основі розробленого методу дозволяють без втручання аналітика в обчислювальний процес вилучити з області пошуку оптимальних розв'язків фрагменти мереж, для яких оцінювання реального ефекту є ускладненим або неможливим через часті відмови та відсутність засобів моніторингу режимів. Це підвищує обґрунтованість технічних рішень.

Ключові слова: розподільні електричні мережі, компенсація реактивної потужності, оцінювання ефективності, комплексний показник, якість функціонування, інтервальный аналіз.

Вступ. Розподільні електричні мережі 10(6) кВ та 0.4 кВ, у яких зосереджено основну частку втрат електроенергії, мають низьку надійність, характеризуються невідповідністю параметрів основного обладнання новим умовам експлуатації, недосконалістю систем релейного захисту та автоматики, складністю резервування, а отже мало пристосовані для впровадження групової компенсації реактивної потужності (КРП) [1].

Розвиток місцевих відновлюваних джерел, зокрема фотоелектричних станцій (ФЕС), дає певні переваги, наприклад, зниження екологічного навантаження, участь абонентів у виробництві енергії, підвищення надійності ЕМ, зниження втрат. Однак збільшення їх кількості ускладнює постановку задачі КРП [2], що пов'язано з урахуванням якості напруги в умовах невизначеності генерування ФЕС. Нові види споживачів також зумовлюють необхідність змін постановки задачі КРП. Так, наприклад, за зростання попиту на електромобілі необхідно враховувати зниження напруги в ЕМ під час використання швидкісних зарядних станцій [3].

Через недосконалість систем технічного та комерційного обліку електроенергії в електричних мережах задачі оптимізації КРП розв'язуються в умовах часткової невизначеності [4].

Отже, для забезпечення ефективної роботи ДРП в таких мережах необхідно враховувати вплив якості мереж на функціонування джерел ще на стадії проектування [5],

необхідно комплексно оцінювати ефект від впровадження ДРП, що пов'язаний зі зниженням втрат електроенергії та підвищенням якості напруги, враховуючи обмеженість вихідної інформації та рівень надійності ЕМ.

Постановка задачі. Переважно, оптимізуючи режими електромереж за реактивною потужністю оцінюють ефект зменшення втрат електроенергії у натуральному, або грошовому виразі [4]. В якості впливових факторів враховують конфігурацію, пасивні параметри та рівні напруги в ЕМ, а також коефіцієнти потужності та обсяги електроспоживання [6, 7]. Однак, крім означених факторів необхідно враховувати зміни режимних параметрів джерел та електромереж, а формальний показник має бути придатним для використання у оптимізаційних розрахунках [8].

Для оцінювання складової показника ефективності функціонування ДРП, що пов'язана з надійністю ЕМ доцільно використовувати методи, побудовані на підставі теорії марковських процесів [9]. Вони дають можливість отримати придатні до практичного застосування математичні моделі імовірності працездатного стану ЕМ з урахуванням процесів пошкодження та відновлення.

Після ідентифікації частково працездатних станів ЕМ та визначення їх ймовірностей на підставі системи диференціальних рівнянь Колмогорова [9], можна узагальнено оцінити ефективність функціонування розподільної мережі у вигляді моделі грошових надходжень від передачі електроенергії мережами [10]:

$$\Pi = b_{ня} \cdot W \cdot E_* + [(b_{нд} - b_{ня})W - b_{\Delta W} \cdot \Delta W] E'_* - (b_{нд} - b_{тар})W, \quad (1)$$

де $b_{тар}$, $b_{\Delta W}$ – відповідно, тариф на передачу 1 кВт·год електроенергії електричними мережами та вартість втрат електроенергії;

$b_{нд}$, $b_{ня}$ – відповідно, питома вартість невідпущеної та неякісної електроенергії;

W та ΔW – корисний відпуск електроенергії споживачам ЕМ та розрахункові втрати електроенергії протягом заданого інтервалу часу T за умови відсутності перерв у електропостачанні;

E_* , E'_* – відповідно, показники якості функціонування ЕМ у критеріальній формі, отримані з урахуванням та без врахування якості електричної енергії:

$$E_* = \sum_{i=1}^n p_i \cdot \frac{1}{P_i[A]^{v_{i1}}} \prod_{j=1}^n P_j[A]^{v_{j1}} - \sum_{i=n+1}^{n+k} p_i \prod_{j=1}^n P_j[A]^{v_{j1}}; \quad (2)$$

$$E'_* = \sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=n+1}^{n+k} p_i,$$

де p_i – імовірність перебування ЕМ у i -му стані;

$P_j[A]$ – імовірність того, що відхилення напруги для j -го стану ЕМ відповідає допустимим межам ($U_{\min} \leq U_{i,j} \leq U_{\max}$);

v^{ji} – елементи матриці переходів, які є алгебраїчними сумами інтенсивностей відмов λ та інтенсивностей відновлення μ [9];

n , k – кількість робочих та неробочих станів у графі станів ЕМ.

Використовуючи описаний підхід щодо оцінювання якості електромереж у поєднанні з інтервальним аналізом втрат електроенергії в мережах було запропоновано метод

однозначного комплексного оцінювання гарантованого ефекту від компенсації реактивної потужності.

Результати досліджень. Встановлення додаткових ДРП практично не впливає на структурну надійність розподільної мережі ($E_*' = const$), а також обсяг корисного відпуску електроенергії споживачам ($W = const$), однак суттєво впливає на режими її роботи. Виходячи з цього, значення втрат електроенергії ΔW та показник якості E_* будуть змінюватися. З урахуванням наведеного ефективність електромереж після встановлення ДРП можна оцінити за виразом:

$$\Pi_k = b_{ня} \cdot W \cdot E_{k*} + [(b_{нд} - b_{ня})W - b_{\Delta W} \cdot \Delta W_k] E_*' - (b_{нд} - b_{тар})W, \quad (3)$$

де E_{k*} , ΔW_k – відповідно, значення показника якості функціонування E_* та втрат електроенергії в мережі після встановлення ДРП на k -ій підстанції. Використовуючи (1) та (3) були виокремлені додаткові грошові надходження завдяки впровадженню ДРП, які є основним джерелом їх окупності:

$$\Delta \Pi_k = \Pi_k - \Pi = b_{ня} \cdot W (E_{k*} - E_*) + b_{\Delta W} (\Delta W - \Delta W_k) E_*'. \quad (4)$$

З (4) видно, що прибутковість КРП залежить не лише від параметрів та характеристик джерел реактивної потужності, але й від рівня зношеності основного обладнання електромережі, у якій ці джерела впроваджуються. Показник ефективності функціонування ДРП (4), виявляється чутливим як до режимів роботи електромережі та ДРП (перша складова), так і до надійності транспортування електроенергії мережами (друга складова). Виходячи з цього, він може бути застосований не лише для оптимізації схем приєднання ДРП на етапі техніко-економічного обґрунтування, а й для оцінювання якості та своєчасності керувальних впливів з оптимізації перетікань реактивної потужності в ЕМ, а отже, для оптимізації налагоджувальних параметрів локальних автоматизованих систем керування ДРП. Використання (4), як цільової функції для проектних та експлуатаційних задач дозволяє реалізувати комплексний підхід до забезпечення ефективності функціонування ДРП у розподільних мережах енергопостачальних компаній.

Однак, через обмеженість інформаційного забезпечення розподільних мереж детерміновані значення корисного відпуску W та втрат електроенергії ΔW , ΔW_k на практиці не можуть бути визначені [4]. Використовуючи результати вимірів та інформацію систем технічного та комерційного обліку електроенергії можна оцінити інтервали невизначеності вказаних параметрів ($[W_{\min}; W_{\max}]$ та $[\Delta W_{\min}; \Delta W_{\max}]$), до яких вони належать з певною імовірністю. Для практичних розрахунків виявляється достатньою забезпечення імовірності на рівні 0.95 [4], що зумовлює ширину інтервалу невизначеності $\pm 2\delta_\Sigma$, де δ_Σ – середньоквадратичне відхилення від математичного значення.

Для оцінювання гарантованого ефекту від впровадження ДРП виходячи з (4) слід використовувати значення відпуску електроенергії та втрат, що відповідають нижній межі інтервалу невизначеності. Приймаючи попередньо розраховані значення корисного відпуску W та втрат електроенергії ΔW , ΔW_k за математичні сподівання, необхідні значення можна подати у вигляді:

$$W_{\min} = W(1 - 2\delta_w); \quad \Delta W_{\min} = \Delta W(1 - 2\delta_{\Delta W}); \quad \Delta W_{k \min} = \Delta W_k(1 - 2\delta_{\Delta W}), \quad (5)$$

де δ_w та $\delta_{\Delta W}$ – відповідно, середньоквадратичні відхилення корисного відпуску та втрат електроенергії, що можуть бути визначені за методиками з [4], причому $\delta_w \leq \delta_{\Delta W}$.

Переписавши (4) з урахуванням недосконалості вихідної інформації отримано нижню межу інтервалу невизначеності додаткових надходжень від впровадження ДРП, яка характеризує гарантований ефект з імовірністю 0.95:

$$\Delta\Pi_{k\min} = \Delta\Pi_k (1 - \delta_{\Pi}); \quad \delta_{\Pi} = 2 \left[\frac{\delta_w}{1 + K_{\text{яв}k}} + \frac{\delta_{\Delta W}}{1 + K_{\text{яв}k}^{-1}} \right]; \quad (6)$$

$$K_{\text{яв}k} = \frac{b_{\Delta W}}{b_{\text{ня}}} d\Delta W_{k*} \cdot dE_{k*}^{-1},$$

де δ_{Π} – відповідає розмаху відхилення величини $\Delta\Pi_k$;

$K_{\text{яв}k}$ – коефіцієнт, який характеризує співвідношення ефекту від зменшення втрат та підвищення якості електроенергії завдяки встановленню ДРП на k-тій підстанції;

$d\Delta W_{k*}$ та dE_{k*} – відносні зменшення втрат електроенергії та показника якості функціонування ЕМ, оцінених за математичними сподіваннями:

$$d\Delta W_{k*} = \frac{\Delta W - \Delta W_k}{W}; \quad dE_{k*} = \frac{E_{k*} - E_*}{E_*}. \quad (7)$$

Залежності комплексного показника ефективності $\Delta\Pi_{k\min}$ від впливових факторів було досліджено на прикладі розподільної мережі 10 кВ, що складається з 30 підстанцій 10/0,4 кВ (встановлена потужність 4395 кВА) та 59 повітряних ліній (сумарна довжина 41 км). Математичне сподівання річного корисного відпуску електроенергії споживачам становить 3.54 млн. кВт*год. Математичне сподівання втрат електроенергії в лініях 10 кВ, розраховане за методом середніх навантажень складає 0.28 млн. кВт*год. Максимальне відхилення напруги, зафіксоване на шинах підстанцій складає 7%, що говорить про порушення обмежень за напругою у мережі ($E_* < E'_*$). Однак ці порушення можуть бути усунені завдяки встановленню ДРП.

На стороні 10 кВ підстанції 10/0,4 кВ з найнижчою напругою було імітовано встановлення ДРП з потужностями від 50 до 500 квар. Коефіцієнт якості електромережі варіювався у діапазоні $E'_* \in (0.7; 0.997)$ шляхом зміни інтенсивності відмов окремих ліній електропередачі. Середньоквадратичні відхилення δ_w та $\delta_{\Delta W}$ змінювалися в діапазонах, що характерні для реальних електричних мереж 10(6) кВ: $\delta_w \in (0.02; 0.15)$, $\delta_{\Delta W} \in (0.1; 0.4)$. Результати розрахунків подано на рисунку.

Аналізуючи вираз (6) та результати обчислювального експерименту (див. рис.) було отримано наступні висновки щодо впливу надійності ЕМ та інформаційного забезпечення на розв'язки задачі оптимізації КРП. Для електричних мереж, які через зношеність основного обладнання мають низьку структурну надійність (рис., а), очікуваний і, відповідно, гарантований ефект від зменшення втрат та регулювання напруги завдяки КРП знижується (до 30%). Тому для його оцінювання необхідно вдосконалювати інформаційне забезпечення, що часто для зношених, ненадійних мереж виявляється технічно недоцільним. Виходячи з цього, обґрунтоване запровадження заходів з КРП потребує попередньої реконструкції мереж для забезпечення нормативних значень показників SAIDI та SAIFI.

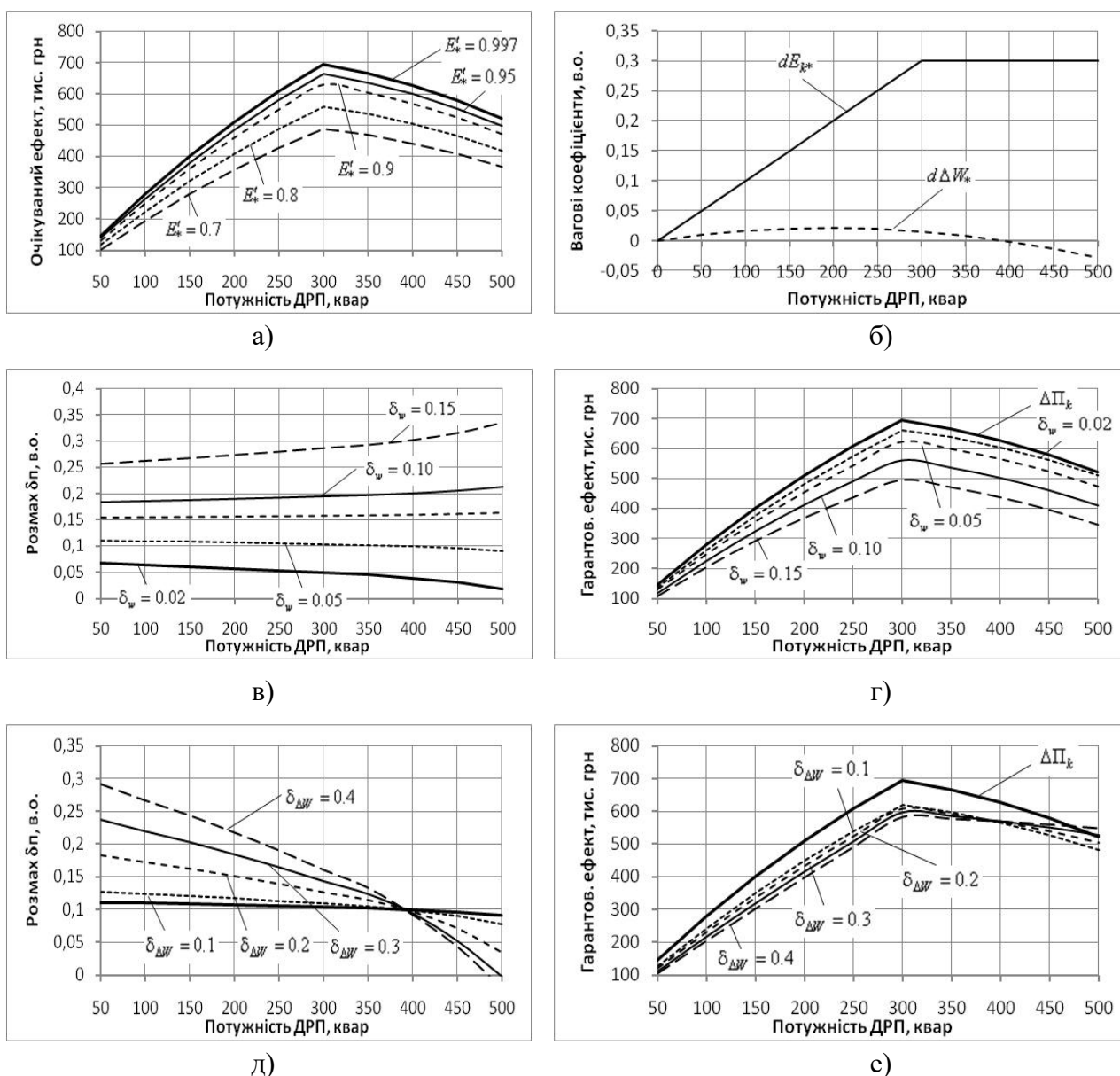


Рис. Вплив надійності мереж та точності інформаційного забезпечення на ефективність компенсації реактивної потужності

Якщо ефект від впровадження ДРП зумовлений, переважно, підвищенням якості напруги, то особливу увагу слід приділити точності визначення корисного відпуску електроенергії δ_w та розподілу його між підстанціями ЕМ. У цьому випадку природно dE_{k^*} виявляється істотно більше за $d\Delta W_k$ (рис., б), що згідно (6), спричиняє збільшення впливу δ_w на розмах відхилення значень оцінюваного ефекту δ_{Π} (рис., в) і, як наслідок, на значення гарантованого ефекту від встановлення ДРП (рис., г).

Якщо задача КРП в електромережах полягає у зменшенні надлишкових втрат електроенергії, то для оцінювання ефекту основну увагу слід приділити зменшенню методичної та інформаційної похибок їх визначення (рис., д), оскільки значні відхилення розрахункових втрат призводять до впливу їх зміни на значення гарантованого ефекту (рис.,

е). А це може призводити до хибних рішень щодо оптимальної потужності ДРП. Практика показує, що у електричних мережах, для яких втрати не можуть бути оцінені з належною точністю ($\delta_{\Delta W} > 0.4$), оптимальну потужність ДРП $Q_{i\text{опт}}$ визначити неможливо. Адже, зростання втрат для значень потужності $Q_i > Q_{i\text{опт}}$ супроводжується зменшенням відхилення $\delta_{\Delta W}$, а отже зростанням розрахункового ефекту від КРП. Таким чином оптимальні потужності ДРП виявляються завищеними, що негативно впливає на рентабельність встановлення пристроїв.

Для дослідження впливу факторів надійності електромереж та якості інформаційного забезпечення на результати розв'язання задачі оптимізації розміщення ДРП у електричних мережах було застосовано авторський програмний комплекс «ВТРАТИ-10». За його допомогою було розраховано відхилення δ_w та $\delta_{\Delta W}$, за методикою, викладеною в [4]. Далі було визначено місця встановлення та потужності ДРП для фрагменту електромереж 10/0,4 кВ без урахування надійності та похибок визначення електричних параметрів (за очікуваним ефектом) та з урахуванням вказаних факторів (за гарантованим ефектом) (табл. 1). Для обох варіантів було розраховано гарантований ефект та оцінено його відхилення (табл. 2).

Таблиця 1.

Розміщення ДРП в електромережах 10/0,4 кВ для забезпечення максимального ефекту

Оптимізація очікуваного ефекту (схема 1)				Оптимізація гарантованого ефекту (схема 2)			
Підстанція	Фідер	Підстанція 10/0,4 кВ	$Q_{i\text{опт}}$, квар	Підстанція	Фідер	Підстанція 10/0,4 кВ	$Q_{i\text{опт}}$, квар
ТП "Нова"	Ф-113	ТП-496	200	ТП "Нова"	Ф-113	ТП-496	200
ТП "Нова"	Ф-111	ТП-292	70	ТП "Нова"	Ф-111	ТП-292	70
ТП "Нова"	Ф-106	ТП-297	70	ТП "Північна"	Ф-204	ТП-429	70
ТП "Західна"	Ф-167	ТП-260	60	ТП "Західна"	Ф-167	ТП-260	60
ТП "Промислова"	Ф-265	ТП-234	60	ТП "Нова"	Ф-111	ТП-74	60
...
ТП "Нова"	Ф-113	ТП-205	40	ТП "Західна"	Ф-167	ТП-369	40
ТП "Нова"	Ф-113	ТП-587	40	ТП "Нова"	Ф-106	ТП-113	40
...
ТП "Нова"	Ф-106	ТП-12	30	ТП "Західна"	Ф-167	ТП-630	30
ТП "Нова"	Ф-106	ТП-225	30	ТП "Західна"	Ф-167	ТП-650	30
...

Результати аналізу ефективності розміщення ДРП в електричних мережах показали, що врахування якості вихідної інформації для задачі КРП дозволяє суттєво (біля 10%, або 500 тис. грн/рік) підвищити гарантований ефект (табл. 3). У випадку, коли перелік потенційних місць встановлення обмежений лише технічними можливостями підстанцій, кількість додатково встановлених ДРП з використанням запропонованого критерію оптимальності виявляється меншою. З переліку мереж для встановлення ДРП автоматично виключаються мережі з частими відмовами та мережі з низькою якістю інформаційного забезпечення.

Таблиця 2.

Оцінювання гарантованого ефекту для варіантів розміщення ДРП в електромережах

Назва підстанції електромереж	Ефект від впровадження ДРП				Зміна гарантованого ефекту КРП	
	Розміщення ДРП за схемою 1		Розміщення ДРП за схемою 2			
	ΔP_k , тис. грн	$\Delta P_{k \min}$ тис. грн	ΔP_k , тис. грн	$\Delta P_{k \min}$ тис. грн	тис. грн	%
Всі підстанції	5051,5	4296,9	4983,8	4797,0	500,1	10,4
ТП "Західна"	799,5	704,8	617,7	587,0	-117,8	-20,1
ТП "Промислова"	440,2	376,8	409,5	393,1	16,4	4,2
ТП "Нова"	3459,6	2930,9	3405,7	3278,3	347,4	10,6
ТП "Центральна"	-	-	128,6	118,3	118,3	-
ТП "Південна"	67,0	33,9	206,6	205,1	171,2	83,5
ТП "Північна"	285,1	250,4	225,9	215,1	-35,4	-16,5
ТП "Технологічна"	-	-	-	-	-	-

Примітка. Розміщення додаткових джерел реактивної потужності виконувалося за критерієм максимуму очікуваного ефекту (схема 1) та максимуму гарантованого ефекту (схема 2)

Висновки. Значна зношеність основного обладнання розподільних електричних мереж України, а також їх недостатня оснащеність засобами телевимірювань та технічного моніторингу зумовлює необхідність урахування означених факторів під час планування заходів щодо зменшення втрат та підвищення якості напруги в мережах. Таким чином, для постановки задачі оптимізації КРП, як функцію мети, слід застосовувати комплексні показники ефективності.

За результатами теоретичних та практичних досліджень запропоновано метод формування комплексного показника гарантованої ефективності впровадження КРП, що на відміну від відомих, враховує надійність електромережі, якість напруги у її вузлах, а також точність визначення корисного відпуску та втрат електроенергії. Це дозволяє автоматично, без залучення фахівців до формування обчислювального експерименту, вилучити з переліку потенційних місць встановлення ДРП фрагменти мереж з частими відмовами та відсутністю засобів моніторингу режимів. Таким чином приймаються більш обґрунтовані рішення щодо місць приєднання та оптимальних потужностей ДРП.

Література

1. Банін Д. Б., Яндульський О. С., Банін М. Д., Боднар А. М., Гнатівський А. В. Економічні еквіваленти реактивної потужності. Математичний та чисельний аналіз. *Промелектро*. 2004. №1. С. 22–33.
 2. S. Ibrahim, A. Cramer, X. Liu and Y. Liao. PV inverter reactive power control for chance-constrained distribution system performance optimisation. *Transmission & Distribution*. 2018. vol. 12. no. 5. pp. 1089-1098.
 3. A. Zecchino, M. Marinelli, C. Træholt and M. Korpås. Guidelines for distribution system operators on reactive power provision by electric vehicles in low-voltage grids. *CIREC* -

References

1. Banin D. B., Yandulskyi O. S., Banin M. D., Bodnar A. M., Hnatovskiy A. V. Ekonomichni ekvivalenty reaktivnoi potuzhnosti. Matematychnyi ta chyselnyi analiz (*Economic equivalents of reactive power. Mathematical and numerical analysis*) *Promelektro*. 2004. no.1. pp. 22–33. (in Ukrainian)
 2. S. Ibrahim, A. Cramer, X. Liu and Y. Liao. PV inverter reactive power control for chance-constrained distribution system performance optimisation. *Transmission & Distribution*. 2018. vol. 12. no. 5. pp. 1089-1098.
 3. A. Zecchino, M. Marinelli, C. Træholt and M. Korpås. Guidelines for distribution system operators on reactive power provision by electric vehicles in low-

Open Access Proceedings Journal. 2017. vol. 2017, no. 1, pp. 1787-1791.

4. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. Москва: ENAS, 2009. 456 с.

5. Лежнюк П. Д., Демов О. Д., Півнюк Ю. Ю. Поетапний розрахунок компенсації реактивної потужності в розподільних електричних мережах із використанням відносних спадів напруги. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2015. Вип. 30. Т. 2. С.108-115.

6. Jizhong Zhu. Optimization of Power System Operation. *Reactive Power Optimization / Zhu Jizhong*. Wiley-IEEE Press, 2009. P. 409-454.

7. Narayan S. Rau. Optimization Principles: Practical Applications to the Operation and Markets of the Electric Power Industry. *Solved Nonlinear Optimization Problems / S. Rau, Narayan*. Wiley-IEEE Press, 2003. P. 245-295.

8. Kulyk V., Burykin O., Pirnyak V. Optimization of the placement of reactive power sources in the electric grid based on modeling of its ideal modes. *Technology audit and production reserves*, 2018, vol. 1, no. 2(40). pp. 59-65.

9. Лежнюк П. Д., Комар В. О. Оцінка якості оптимального керування критеріальним методом: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. 108 с.

10. Burykin O., Lezhniuk P., Kulyk V., Malogulko Yu. Optimization of the functioning of the renewable energy sources in the local electrical systems: monograph. Vinnytsya: VNTU, 2018. 124 p.

voltage grids. *CIREC - Open Access Proceedings Journal*. 2017. vol. 2017, no. 1, pp. 1787-1791.

4. Zhelezko Yu.S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov (*Loss of electricity. Reactive power. Quality of electricity: a guide for practical calculations*). Moscow: ENAS, 2009. 456 p. (in Russian)

5. Lezhniuk P. D., Demov O. D., Pivniuk Yu.Yu. Poetapnyi rozrakhunok kompensatsii reaktivnoi potuzhnosti v rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh iz vykorystanniam vidnosnykh spadiv napruhy (*Phased calculation of reactive power compensation in distribution networks using relative voltage drops*). *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky*. 2015. no. 30. vol. 2. pp.108-115. (in Ukrainian)

6. Jizhong Zhu. Optimization of Power System Operation. *Reactive Power Optimization / Zhu Jizhong*. Wiley-IEEE Press, 2009. pp. 409-454.

Narayan S. Rau. Optimization Principles: Practical Applications to the Operation and Markets of the Electric Power Industry. *Solved Nonlinear Optimization Problems / S. Rau, Narayan*. Wiley-IEEE Press, 2003. pp. 245-295.

8. V. Kulyk, O. Burykin, V. Pirnyak. Optimization of the placement of reactive power sources in the electric grid based on modeling of its ideal modes. *Technology audit and production reserves*, 2018, vol. 1, no. 2(40). pp. 59-65.

9. Lezhniuk P. D., Komar V. O. Otsinka yakosti optymalnoho keruvannia kryterialnym metodom (*Evaluation of the quality of optimal control by the criterion method*): monohraf. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2006. 108 p. (in Ukrainian)

10. Burykin O., Lezhniuk P., Kulyk V., Malogulko Yu. Optimization of the functioning of the renewable energy sources in the local electrical systems: monograph. Vinnytsya: VNTU, 2018. 124 p.

KULYK VOLODYMYR

volodymyrvkulyk@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7594-5661

Researcher ID: R-1122-2018

Department of Electrical Stations and Systems
Vinnytsya National Technical University

BURYKIN OLEKSANDR

mr.burykin@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0067-3630

Researcher ID: A-9478-2014

Department of Electrical Stations and Systems
Vinnytsya National Technical University

PIRNYAK VIKTOR

vpirnyak@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4550-6411

Head of the Internal Audit Department of the enterprise
LLC «Podilskiy Energoconsulting»

**КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВСТАНОВЛЕННЯ
ДОДАТКОВИХ ДЖЕРЕЛ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РОЗПОДІЛЬНИХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

КУЛИК В. В.^{*}, БУРИКІН О. Б.^{*}, ПІРНЯК В. М.^{}**

^{*}Вінницький національний технічний університет,

^{**}ТОВ «Подільський енергоконсалтинг»

Цель. Разработка метода комплексной оценки эффективности расстановки источников реактивной мощности (ИРМ) в электрических сетях.

Методика. Показатель эффективности получен путем объединения метода оценки качества функционирования электрических сетей на основе сетей Маркова и метода интервального анализа потерь электроэнергии.

Результаты. Полученный показатель позволяет усовершенствовать постановку задачи оптимизации размещения ИРМ в электрических сетях и повысить качество ее решения.

Научная новизна. Предложен метод формирования показателя гарантированной эффективности расстановки ИРМ, который обеспечивает ее однозначную комплексную оценку с учетом надежности электрической сети, качества напряжения в ее узлах, а также точности определения отпуска и потерь электроэнергии.

Практическая значимость. Алгоритмы оптимизации размещения ИРМ, построенные на основе разработанного метода позволяют без вмешательства специалиста в вычислительный процесс исключить из области поиска оптимальных решений фрагменты сети, для которых оценивание реального эффекта затруднено или невозможно из-за частых отказов или отсутствия средств мониторинга режимов. Это повышает обоснованность технических решений.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, компенсация реактивной мощности, оценивание эффективности, комплексный показатель, качество функционирования, интервальный анализ.

**COMPREHENSIVE EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF INSTALLING THE
REACTIVE POWER SOURCES IN DISTRIBUTION ELECTRIC GRIDS**

KULYK V.^{*}, BURYKIN O.^{*}, PIRNYAK V.^{}**

^{*}Vinnytsya National Technical University,

^{**}Podilsky Energoconsulting Ltd.

Goal. To develop a method for assessing the effectiveness of reactive power sources (RPS) in electrical grids.

Methodology. The efficiency indicator was obtained as a result of combining the method of assessing the quality of the functioning of electrical grids on the basis of Markov networks and the method of interval analysis of energy losses.

Findings. The efficiency index improves the formulation of the problem of optimizing the connection of the RPS to electrical networks. It improves the quality of this task.

Originality. A new method of forming an indicator of the guaranteed effectiveness of the installing the RPS is obtained. It provides an unambiguous comprehensive evaluation of efficiency, takes into account the reliability of the electrical network, the quality of the voltage in its nodes, the accuracy of calculating the released and lost electricity.

Practical value. The method makes it possible to construct more efficient algorithms for optimizing the connection of RPS. They allow excluding from the search area optimal solutions "indefinite" fragments of the network without the help of an analyst. Estimation of the real effect is difficult or impossible for such fragments due to frequent failures or lack of monitoring devices. This correction of the search area improves the quality of the solution.

Key words: distribution electric grids, reactive power compensation, effectiveness estimation, complex indicator, quality of functioning, interval analysis.

УДК 001.82:677.
076:687.268.1

СЛІЗКОВ А. М.*, МИХАЙЛОВА Г. М.**,
ОСІЄВСЬКА В. В.**

*Київський національний університет технологій та дизайну

**Київський національний торговельно-економічний університет

РОЗРОБЛЕННЯ НАУКОВОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕКСТИЛЬНИХ ВИРОБІВ ДЛЯ СНУ З ОБ'ЄМНИМИ НАПОВНЮВАЧАМИ НА ПРИКЛАДІ ПОДУШОК

Мета. Аналіз існуючих систем класифікації постільних виробів та розроблення наукової класифікації на прикладі подушок.

Методика. Використано методи логічного аналізу й узагальнення наукової літератури та нормативних документів.

Результати. Проаналізовано перелік класифікаційних ознак подушок, що використовуються під час формування їхнього асортименту. Представлено детальну класифікацію подушок у вигляді ієрархічної системи підмножини, де враховуються властивості подушок і закономірні зв'язки між ними.

Наукова новизна. Розроблено наукову класифікацію текстильних виробів для сну на прикладі одного виду – подушок.

Практична значимість. Наукова класифікація текстильних виробів для сну дозволяє визначити місце цієї групи товарів у розділі текстильних товарів, що покращує торговельно-контрактні умови.

Ключові слова: класифікація, класифікаційні ознаки, текстильні вироби для сну, подушки

Вступ. Класифікація і науковий аналіз є безумовними факторами загального процесу пізнання оточуючої дійсності. В науковій діяльності людини класифікації відіграють суттєву роль, яка визначає якість та ефективність наукових досліджень [1].

За енциклопедичним визначенням класифікація (франц., англ. *classification* походить від лат. *classis* – клас і *facio* – роблю) є системою розподілення об'єктів (процесів, явищ) за класами (групами тощо) відповідно до визначених ознак. Класифікація – це також дія (процес) за значенням дієслова класифікувати [2].

Питаннями розроблення або вдосконалення існуючих класифікацій текстильних матеріалів та виробів займалися ряд вчених. Зокрема, провідні вчені України вивчали класифікацію камвольних та бавовняних тканин [3, 4], постільної білизни [5], текстильного одягу та одягу зі шкіри [6-8], корсетних виробів [9], пір'яно-пухової сировини для наповнювачів [10], геосинтетичних матеріалів [11]. Поряд із цим питання чіткого розподілення текстильних виробів для сну з об'ємними наповнювачами досліджені недостатньо, що ускладнює управління їх асортиментом та виконання торговельно-контрактних умов.

Постановка завдання. Розширення асортименту непродовольчих товарів – текстильних виробів для сну, освоєння нових сучасних видів сировини та матеріалів для їх виготовлення, застосування нових технологій та устаткування вимагають розроблення єдиних підходів до визначення та оцінювання нових властивостей матеріалів та виробів і розроблення на їх основі більш досконалих класифікацій як способу пізнання та управління їх асортиментом.

Сучасний асортимент постільних виробів з об'ємними наповнювачами, які випускаються підприємствами текстильної промисловості України та імпортуються на її територію, досить складний та різноманітний. До групи «текстильні вироби для сну з об'ємними наповнювачами» відносяться матраци, намотрацники, ковдри, подушки [12]. Вони виготовляються із різноманітних матеріалів, мають різні характеристики та обробку. Постійне оновлення структури асортименту цієї групи товарів вимагають вдосконалення існуючої системи класифікації, яка б в повній мірі задовольняла потреби споживачів.

Результати дослідження. Для обробки науково-обґрунтованих концепцій формування сучасного асортименту постільних виробів (текстильних виробів для сну) з об'ємними наповнювачами застосовують різні системи класифікації. В їх основу можуть бути покладені різні класифікаційні ознаки, основними з яких є: призначення, спосіб виробництва, сировинний склад тощо. Найширше застосування у практиці текстильного виробництва, торгівлі та використання мають стандартна, загальнодержавна та статистична системи класифікації.

На сьогодні в різних нормативних документах (в подальшому – НД) існують розбіжності у визначеннях текстильних виробів для сну з об'ємними наповнювачами. Так в ДСТУ 2027-92 «Вироби швейні й трикотажні. Терміни та визначення» під постільною білизною визначають швейний виріб для створення необхідних гігієнічних умов спального місця [13]. Поряд із цим в ДСТУ EN 131866:2010 [14] зазначено, що до постільної білизни відносять усі види стьобаних ковдр та подушок, незалежно від розміру, способу виготовлення і застосування. Тому для управління асортиментом цих виробів необхідне створення їх класифікації з чітким термінологічним визначенням кожної складової, що відноситься до групи «текстильні вироби для сну».

Проаналізуємо деякі існуючі класифікатори. Так український класифікатор нормативних документів (УКНД) ДК 004:2008 має ієрархічну трирівневу систему, яка передбачає поділ на 40 класів (рівень 1). Класи поділено на 392 групи (рівень 2), які в свою чергу мають 909 підгруп (рівень 3) [15].

Текстильні вироби для сну з об'ємними наповнювачами та матеріали для їх виготовлення віднесені до 59 та 97 груп (табл. 1).

Таблиця 1

Класифікація нормативних документів

1 рівень	2 рівень	3 рівень
59 – технологія текстильного та шкіряного виробництва	59.040 – допоміжні матеріали для оздоблення текстилю (охоплює пух і пір'я)	-
	59.060 – текстильні волокна	59.060.01 – текстильні волокна взагалі (охоплює змішані волокна)
		59.060.10 – натуральні волокна
		59.060.20 - хімічні волокна
		59.060.99 – інші текстильні волокна

Продовження таблиці 1

97 – побутова техніка та торговельне устаткування. Відпочинок. Спорт	97.160 – домашній текстиль. Білизна (охоплює перини, ковдри, спальну білизну)	-
--	---	---

Проаналізувавши класифікацію цих нормативних документів, необхідно відмітити, що на першому рівні класифікації вказується і технологія виготовлення і галузь використання виробів, на другому рівні – сировина та матеріали з яких виготовляють текстильні вироби для сну, а також безпосередньо ці вироби. Хоча, пух та пір'я не є допоміжними матеріалами, а наповнювачем для цих виробів, тому їх доцільно віднести до 59.060 групи. Варто відмітити, що перелік виробів в групі 97.1560 доцільним було б доповнити наступними видами – матрац, наматрацник і подушки.

Класифікація видів економічної діяльності (КВЕД) ДК 009:2010 [16] встановлює основи для підготовки і поширення статистичної інформації за видами економічної діяльності. Класифікація видів економічної діяльності (КВЕД) – складова частина державної системи класифікації і кодування техніко-економічної та соціальної інформації в Україні. Класифікатор гармонізовано із статистичною класифікацією видів економічної діяльності у Європейському Співтоваристві (NACE), що у свою чергу є гармонізованою із міжнародною стандартною галузевою класифікацією (ISIC).

Структура кодового позначення об'єкта КВЕД має наступний вигляд: YXX.XX, де Y – секція, XX – розділ, XX.X – група, XX.XX – клас.

КВЕД гармонізовано на рівні Y XX (розділ) з Міжнародною стандартною галузевою класифікацією всіх видів економічної діяльності (ISIC, Rev. 4- 2008) та на рівні YXX.XX (клас) – Класифікацією видів економічної діяльності ЄС (NACE, Rev. 2 - 2006)/

Деталізоване позначення коду текстильних виробів (в тому числі постільних виробів) за даною системою наведено в *табл. 2*.

Таблиця 2

Кодова система КВЕД для текстильних товарів

Код	Назва	NACE (Rev.1.1)	ISIC (Rev.4)
C	Переробна промисловість	-	-
13,0	Текстильне виробництво	-	-
13,92	Виробництво готових текстильних виробів, крім одягу	17,40	1392
13,99	Виробництво інших текстильних виробів	36,63	1399

Код 13.92 включає виробництво готових виробів з будь-яких текстильних матеріалів, у тому числі із в'язаного або трикотажного полотна, зокрема: ковдр, у тому числі пледів;

постільної, столової, туалетної або кухонної білизни; стьобаних пухових ковдр, диванних подушок, пуфів, спальних подушок, спальних мішків тощо. Код 13.99 включає виробництво виробів текстильних стьобаних. Необхідно відмітити, що в класифікації за КВЕД є незрозумілим, які саме текстильні вироби відносяться до стьобаних в групі 13.99, адже стьобані пухові ковдри відносяться до коду 13.92.

Українські підприємства наразі активно співпрацюють із зовнішніми контрагентами, експортують та імпортують товари та послуги, тому доцільно розглянути українську класифікацію товарів зовнішньоекономічної діяльності (УКТЗЕД), що використовується для цілей тарифного та інших видів регулювання зовнішньоекономічної діяльності, ведення статистики зовнішньої торгівлі, здійснення митного оформлення товарів. Вона містить певну інформацію про класифікацію текстильних виробів для сну з об'ємними наповнювачами [17].

Згідно УКТЗЕД постільні вироби з об'ємними наповнювачами належать до товарної позиції 9404 «Основи матраці; постільні речі та подібні вироби (наприклад, матраци, стьобані ковдри пухові та пір'яні, диванні подушки, пуфи і подушки), з пружинами або заповнені будь-якими матеріалами чи вироблені з пористої гуми або полімерних матеріалів, з покриттям чи без покриття».

В результаті аналізу товарної позиції 9404, можна зробити висновок, що основними класифікаційними ознаками текстильних виробів для сну за УКТЗЕД є назва товару та сировинний склад наповнювача.

Оскільки до групи текстильних виробів для сну з об'ємними наповнювачами відносяться декілька видів, вважаємо за доцільне в представлений статті розглянути детальну класифікацію тільки одного – подушок.

Подушка – набитий пухом, пір'ям, сіном та ін. мішок, який використовується як м'яка підстилка під голову, для сидіння та інших цілей [18, С.825] або постільна білизна на яку кладуть голову під час відпочинку, що складається із обшивки і наповнювача [14].

Відповідно до ДСТУ ГОСТ 30332:2007 «Вироби пір'яно-пухові. Загальні технічні умови» подушки належать до першої групи «вироби спальні» [19]. В цьому НД подушки класифікують лише за двома ознаками, а саме: за розміром та тип наповнювача, а саме за типом наповнювача вони поділяються на пухові, напівпухові та перопухові та наступних розмірів: 38×38; 60×60; 68×68; 78×78 та 96×60 см.

Більш детальне визначення подушок за різними ознаками представлено в ТУ У 17.4-14338122-033:2006 «Вироби перо-пухові спальні. Ковдри та подушки» (ТОВ «Герд Біллербек ГмбХ») [20]. За цим НД подушки поділяються за наступними класифікаційними ознаками: тип наповнювача, категорія наповнювача, маса наповнювача, конструкція напірника, розмір.

За найменуванням наповнювача:

- пухові покращені (пух гусячий митий не менше 90%, пір'я дрібне гусяче мите не більше 10 %);
- пухові (пух гусячий митий не менше 70%, пір'я дрібне гусяче мите не більше 30%);

- напівпухові покращені (пух гусячий митий не менше 50%, пір'я дрібне гусяче мите не більше 50 %);
- напівпухові (пух гусячий митий не менше 30%, пір'я дрібне гусяче мите не більше 70 %);;
- пір'яні покращені (пух гусячий митий не менше 15%, пір'я дрібне гусяче мите не більше 85 %);;
- пір'яні (піря дрібне та середнє гусяче мите 100%).

За категоріями наповнювача:

- пухові екстра;
- пухові першої категорії;
- напівпухові першої категорії;
- перові першої категорії «а».

За конструкцією наволочки та масою наповнювача:

- звичайні;
- трьохкамерні;
- дитячі;
- для дітей новонароджених.

Відповідно до ТУ У 17.4-14338122-033:2006 подушки виготовляють за більш різноманітними розмірами (см): 80×80; 78×78; 70×70; 60×80; 68×68; 60×60; 50×70; 40×80; 50×50; 50×80; 40×60; 40×40; 38×38; 36×48, це розширює асортимент подушок і більш сприятливе для споживача.

Отже, необхідно відмітити, що різні ознаки: розмір, склад і вміст наповнювача, різне відсоткове співвідношення пуху та пера роблять асортимент подушок відповідно ТУ У 17.4-14338122-033:2006 «Вироби перо-пухові спальні. Ковдри та подушки» є досить різноманітним, що дозволяє краще управляти цим асортиментом товарів.

На сьогодні в торговельних мережах України реалізуються подушки різного цільового призначення, різних форм та розмірів, використовується різноманітний тип наповнювача, вид та тип напірника. Оскільки в торговельній мережі реалізується значно ширший асортимент подушок, вважаємо розробити нову наукову класифікацію подушок, використовуючи всі ознаки. Для детальної класифікації подушок доцільно представити її у вигляді ієрархічної системи підмножини, враховуючи властивості подушок і закономірні зв'язки між ними дотримуючись наукових принципів та правил систематики [21]. Відомо [22], що для позначення підмножин, або рівнів класифікації, використовуються різні таксономічні категорії: розділ, клас, група, вид тощо, а віднесення об'єктів класифікації до тієї чи іншої категорії має відбуватися за певними ознаками.

Враховуючи наведений вище аналіз відомих класифікацій текстильних виробів для сну, зокрема подушок, нами було розроблено узагальнюючу класифікацію подушок (рис. 1). Представлена класифікація (рисунок) поділяється на два рівні: вищий та нижчий.

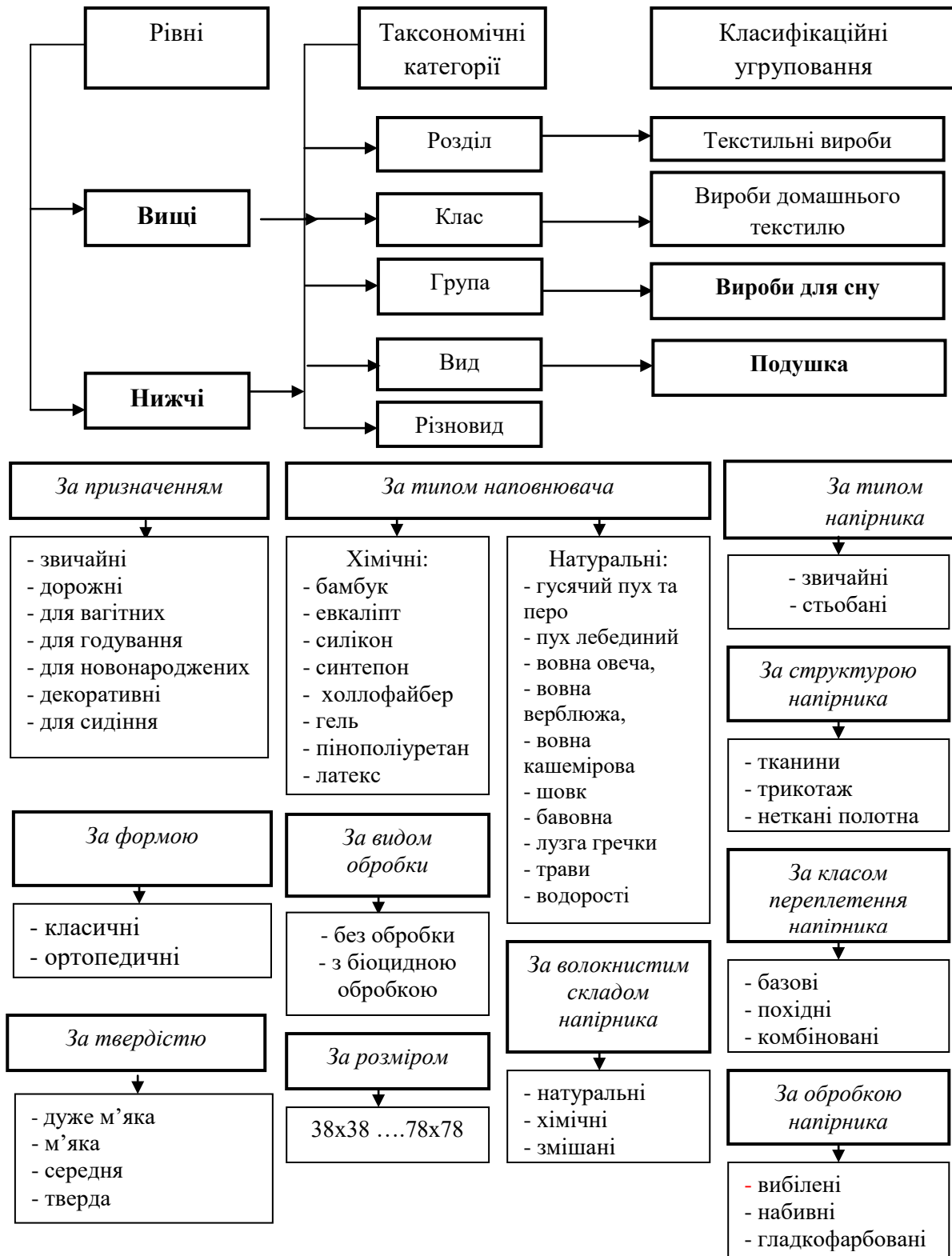


Рис. 1. Наукова класифікація текстильних виробів для сну (на прикладі подушок)

На вищому рівні класифікації наведено такі таксономічні категорії як розділ, клас та група. Найвищою таксономічною категорією є розділ. Оскільки матеріали для напирників подушки виготовляються із текстильних матеріалів, то вони відносяться до розділу «текстильні вироби».

У свою чергу, подушки належать до класу «виробів домашнього текстилю» та групи «вироби для сну» тому до нижчого рівня класифікації належать такі таксономічні категорії як вид та різновид.

За призначенням подушки класифікуються: звичайні (для щоденного комфортного сну), дорожні, для вагітних, для годування дитини, подушки для новонароджених, декоративні, подушки для сидіння.

Важливою ознакою для подушок також є їх форма. Так за формою подушки бувають класичні та ортопедичні. *Класичні* – подушки квадратної або прямокутної форми рівномірно опуклі з двох сторін. *Ортопедичні* – подушки мають особливу форму, що відповідає вигинам тіла людини та забезпечують оптимальну підтримку голови та шиї під час сну. Завдяки цьому шийний відділ хребта розташовується в максимально зручному фізіологічному положенні і не відчуває навантаження під час сну, кровопостачання мозку є найбільш оптимальне. Такі вироби не можуть бути занадто м'якими і в основному виготовлені з піноматеріалів [23, 24].

Всі подушки також доцільно класифікувати за типом наповнювача. В якості наповнювача використовують натуральні та хімічні текстильні матеріали. До натуральних наповнювачів відносять наповнювачі тваринного походження – овеча, верблюжа та кашемірова вовна, шовк, гусячі пух та перо, лебединий пух, а також використовують і рослинні наповнювачі природного походження – бавовняні волокна, трави, водорості, лузга гречки.

Для вовняного наповнювача використовується пухове підшерстя або верхній волосяний верблюдів, кіз або овець. Як правило, подушки з вовняним вмістом випускають із вмістом синтетичних волокон – внутрішній наповнюється поліефірним волокном, синтепоном, а верхній з натуральної вовни. Це робить подушку дешевшою та довговічною. Однією з переваг таких подушок є властивість відштовхування бруду [25].

Подушки з пухо-перовим наповнювачем виготовляють з сировини, отриманої від водоплавних птахів – гусей, качок. Властивості подушки залежать від кількісного співвідношення м'якого пуху і більш жорсткого пір'я. Вони можуть змішуватися або поміщатися в різні камери. Сировину, отриману від гусей, вважається більш м'яким і еластичним, ніж качине [26].

Користуються попитом подушки, що мають наповнювач з водорості, оскільки морські водорості – потужний антиоксидант, який контролює роботу імунної і гормональної системи. Велика кількість корисних для людського організму хімічних елементів запобігають розвитку таких захворювань, як цукровий діабет, ожиріння та інших [25].

Наповнювач для подушки з гречаної лузги належить до виду рослинних наповнювачів. Ретельно очищені, пропарені та відшліфовані зерна гречки мають форму порожніх пірамідок. В

лушпинні не заводяться кліщі, не скупчується пил. Гречане наповнення надає виробу масажний ефект і тонкий приємний аромат [25].

Також в якості наповнювача широко застосовуються хімічні штучні волокна – бамбукові, евкаліптові та кукурудзяні. Ці волокнисті наповнювачі характеризуються позитивними властивостями не накопичують пил і неприємний запах, але в той же час, при їх довготривалому застосуванні накопичуються шкідливі мікроорганізми і можливий ризик виникнення алергічних реакцій в людини [25].

Хімічні синтетичні текстильні наповнювачі є гіпералергенними. Для наповнювачів подушок використовують такі волокна як силіконові, холлофайбер, а також структурне волокнисте утворення – синтепон та фрагменти каучукової піни з отворами для циркуляції повітря – латекс. Так холлофайбер є волокном, яке отримують з поліефірних порожнистих спіралеподібних волокон, що утворюють велику кількість повітряних порожнин. Силіконове волокно отримують з поліестеру, який покритий силіконом. Синтепон тривалий час здатен утримувати тепло. Вироби з синтепону мають малу вагу, при стисненні не деформуються, швидко висихають і не вбирають рідину. Латексний матеріал поєднує два важливі якості: еластичність і пружність, що забезпечує комфортний сон. Перевагами такого наповнювача для подушок є те, що він не вбирає вологу, добре пропускає повітря, в міру пружний, регулює теплообмін, швидко відновлює форму та довговічний [25, 27].

Для забезпечення безпечності подушок доцільно використовувати біоцидні обробки, які унеможливають або пригнітують розмноження шкідливих бактерій, грибів під час експлуатації подушок [28, 29]. Тому також доцільно класифікувати подушки за видом обробки: без обробки наповнювача та з біоцидною обробкою.

Окрім вищезазначеного важливою ознакою подушок для споживача є їх поділ за м'якістю (твердістю). Ряд зарубіжних фірм Haussling; Kauffmann (Німеччина); Maya Tekstil (Туреччина) подушки з перо-пуховим наповнювачем умовно ділять на 4 категорії: тверді, середні, м'які і дуже м'які [30]. Однак пропонуючи різні варіанти оцінки м'якості (твердості) подушок жодна з фірм уніфікацію подушок за величиною поверхневої або об'ємної густини наповнювача не визначала. Тому на цьому етапі пропонуємо ввести наступний поділ подушок за твердістю:

- «тверді» подушки мають в якості наповнювача до 100% пера (в основному гусячого);
- «середні» подушки містять в складі наповнювача 15% пуху і 85% пера;
- «м'які» подушки – відповідно 30% пуху і 70% пера або 50% пуху і 50% пера;
- «дуже м'які» подушки, в яких наповнювач складається з 90% пуху і 10% пера.

Однозначно важливою класифікаційною ознакою є розмір подушки, який може бути різний. Приклади розмірів подушок наведено вище.

Ще однією класифікаційною ознакою подушок є тип і структура напірника, залежно від пошиття він може бути звичайним або стьобаним та поділятися за видом текстильного виробу – виготовлений з тканого, трикотажного або нетканого текстильного матеріалу. За волокнистим складом напірники можуть бути виготовлені з натуральних, хімічних та суміші волокон. За переплетенням матеріалу - основних, похідних та комбінованих переплетень. За художньо-

колористичним оформленням напірники можуть бути вибілені, набивні, пістрявоткані та гладкофарбовані.

Висновки. Представлена розроблена наукова класифікація текстильних виробів для сну з об'ємними наповнювачами (на прикладі подушок).

В розробленій науковій класифікації на вищому рівні класифікації визначені таксономічні рівні – розділ, клас, група і відповідно до них визначені класифікаційні утворення – текстильні вироби, вироби домашнього текстилю та вироби для сну. На нижчому рівні визначено вид текстильних виробів для сну – подушки (для прикладу). В наступному поділі визначені різновиди подушок, які представлено на рисунку.

В запропонованій класифікації є різновиди подушок, які відрізняються за призначенням, формою, розміром, твердістю, типом та обробкою наповнювача, видом і матеріалом напірника, а також волокнистим складом, переплетенням напірника та характером обробки напірника.

Розроблена наукова класифікація дозволить товаровознавцям, виробникам продукції, працівникам торгівлі більш доступно систематизувати та вивчати такий вид товару, як подушки, а також краще управляти їх асортиментом.

Література

1. Класифікація непродовольчих товарів: монографія / А. А. Мазаракі, Н.В. Мережко та ін.; за заг. ред. А. А. Мазаракі. – Київ: Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2016. – 592 с.
2. Сучасні товаровознавчі терміни: тлумачний словник / Г. Ф. Пугачевський, Н. К. Кисляк, Г. М. Михайлова та ін. – Київ: Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2008. – 139 с.
3. Осипенко Н. І. Теоретико-методологічні засади формування якості та асортименту камвольних тканин: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук 05.19.08. / Н. І. Осипенко. – К. – 2007. – 42 с.
4. Матвейцова Д. С. Формування асортименту та класифікація бавовняних тканин / Д. С. Матвейцова, С. А. Карван, О. А. Параска // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. - №4. – С. 196-203.
5. Михайлова Г. М. Особливості класифікації постільних виробів / Г. М. Михайлова, Ю. В. Гілевич, Н. М. Матієнко-Купріянова // Актуальні проблеми теорії і практики експертизи товарів. Матеріали IV Міжнародної практичної інтернет-конференції. – Полтава: ПУЕТ, 2017. – С. 33-38.
6. Колосніченко М. В. Мода і одяг. Основи проектування та виробництва одягу / М. В. Колосніченко, К. Л. Процик. – К.: КНУТД,

References

1. Mazaraki, A. A., Merezhko, N. V., Koptiukh, L. A., Indutnyi, V. V., Kaluha, N. V., Karavaiev, T. A. et al (2016). Klyasyfikatsiia neproduvolchych tovariv [Classification of nonfood commodities : monograph]. Kyiv : Kyiv. nats. torh.-ekon. un-t [in Ukrainian].
2. Puhachevskiy, H. F., Kysliak, N. K., Mykhailova, H. M. et al (2008). Suchasni tovaroznavchi terminy: tлумachnyi slovnyk [Modern commodity expert terms: explanatory dictionary]. Kyiv: Kyiv. nats. torh.-ekon. un-t [in Ukrainian].
3. Osypenko, N. I. (2007). Teoretyko-metodolohichni zasady formuvannia yakosti ta asortymentu kamvolnykh tkanyn [Theoretical and methodological principles of forming of quality and assortment of fabrics]. Kyiv: Kyiv. nats. torh.-ekon. un-t [in Ukrainian].
4. Matveitsova, D. S., Karvan, S. A. & Paraska, O. A. (2014). Formuvannia asortymentu ta klasyfikatsiia bavovnianykh tkanyn [Forming of assortment and classification of cottonades] Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Herald of Khmelnytskyi national university. Vol. 4, 196-203 [in Ukrainian].
5. Mykhailova, H. M., Hilevich, Yu. V., Matienko-Kupriianova, N. M. (2017). Osoblyvosti klasyfikatsii postilnykh vyrobiv [Features of classification of bed wares]. Urgent issues of the theory and practice of commodity expertise. 4th International scientific and practical internet conference. – Aktualni problemy teorii i praktyky ekspertyzy tovariv. IV Mizhnarodna praktychna internet-konferentsia (pp. 33-38). Poltava: PUET [in Ukrainian].
6. Kolosnichenko, M. V., Protsyk, K. L. (2011). Moda i odiah. Osnovy proektuvannia ta vyrobnytstva odiahu. [Fashion and clothing. Bases of planning and production of clothing]. – Kyiv : KNUTD, [in Ukrainian].
7. Oliinyk, Yu. O., Martosenko, M. H. (2016). Suchasna

2011. – 238 с.

7. Олійник Ю. О. Сучасна класифікація виробів трикотажних білизняних для дітей / Ю. О. Олійник, М. Г. Мартосенко // Актуальні проблеми теорії і практики експертизи товарів. Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції м. Полтава, ПУЕТ, 16-18 березня 2016. – С. 41-47.

8. Браїлко А. С. Класифікація одягу зі шкіри як складова побудови моделі розпізнавання, призначеної для проведення ідентифікаційної та товарознавчої експертизи / А. С. Браїлко // Товарознавство та інновації: зб. наук. пр. Вип 2. Донецьк: ДонНУЕТ, 2010. – С.257-266.

9. Щербініна І. Проблеми класифікації корсетних виробів / І. О. Щербініна // Товари і ринки. – 2011. – №2. – 162-173.

10. Mykhailova G. Quality Assessment of Feather-Down ram materials as Fillers for Bedding Products / G. Mykhailova, S. Bulenok // Commodity Science in Research and Practice – Non-food products' quality and innovations (R. Salerno-Kochan – ed.), Polish Society of Commodity Science, Cracow, pp. 119-124. ISBN: 978-83-940189-8-6.

11. Полікарпов І. С. Класифікація геосинтетичних матеріалів / І. С. Полікарпов, Н.А. Терешкевич // Вісник Львівської комерційної академії. Серія товарознавча. – 2013. – Вип. 13. – С. 61-64.

12. Слізков А. М. Постільні вироби – проблеми термінології / А. М. Слізков, Г. М. Михайлова // Підприємництво, торгівля, маркетинг: стратегії, технології та інновації: матеріали міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції . м. Київ, КНТЕУ. 23 травня 2018 р.. – С.107-112.

13. ДСТУ 2027-92. Вироби швейні й трикотажні. Терміни та визначення. [Чинний від 01.01.93]. Київ: Держстандарт України, 1992. 14 с.

14. ДСТУ EN 131866:2010. Білизна постільна, наповнена пером і пухом. Технічні умови . [Чинний від 2012-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2014. 10 с.

15. ДК 004-2008. Український класифікатор нормативних документів. [Чинний від 01.04.2009] – Режим доступу: http://legalexpert.in.ua/standarty-i-normativi/mi_nisterstva-i-vedomstva/klassifikatory/raznoe/7735-dk-004-2008.

16. Національний класифікатор України. Класифікація видів економічної діяльності [Чинний від 01.01. 2012] – Режим доступу:

klasifikatsiia vyrobiv trykotazhnykh bilyznianykh dlia ditei [Modern classification of knittings linen wares for children]. Urgent issues of the theory and practice of commodity expertise. 4th International scientific and practical internet conference. – Aktualni problemy teorii i praktyky ekspertyzy tovariv. III mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsia. (pp. 41-47). Poltava: PUET [in Ukrainian].

8. Brailko, A. S. (2010). Klyasyfikatsiia odiahu zi shkiry yak skladova pobudovy modeli rozpoznavannia, pryznachenoї dlia provedennia identyfikatsiinoї ta tovaroznavchoї ekspertyzy. [Classification of leather clothing as constituent of construction of the model of recognition, intended for realization of identification and commodity expert examination]. Tovaroznavstvo ta innovatsii: zb. nauk. pr. – Commodity Studies and Innovations. (p. 257-266) Donetsk : DonNUET [in Ukrainian].

9. Shcherbinina, I. O. (2011). Problemy klasyfikatsii korsetnykh vyrobiv. [Problems of classification of corset wares]. Tovary i rynky. – Commodities and markets – Vol. 2, 162-173 [in Ukrainian].

10. Mykhailova G. Quality Assessment of Feather-Down ram materials as Fillers for Bedding Products / G. Mykhailova, S. Bulenok // Commodity Science in Research and Practice – Non-food products' quality and innovations (R. Salerno-Kochan – ed.), Polish Society of Commodity Science, Cracow, pp. 119-124. ISBN: 978-83-940189-8-6 [in English].

11. Polikarpov, I. S., Polikarpov, I. S., Tereshkevych, N. A. (2013). Klyasyfikatsiia heosytetychnykh materialiv. [Classification of geosynthetic materials]. Visnyk Lvivskoi komertsii noi akademii. Seriia tovaroznavcha. – Herald Lviv University of Trade and Economics. Vol. 13. pp. 61-64 [in Ukrainian].

12. Slizkov, A. M., Mykhailova, H. M. (2018). Postilni vyroby – problemy terminologii. [Bed wares – problems of terminology]. Pidpriemnytstvo, torhivlia, marketynh: stratehii, tekhnologii ta innovatsii: materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi Internet-konferentsii – Entrepreneurship, trade, marketing: strategies, technologies and innovations: materials of the international scientific and practical Internet conference. (pp. S.107-112). Kyiv, KNTEU [in Ukrainian].

13. DSTU 2027-92. Vyroby shveini y trykotazhni. Terminy ta vyznachennia. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 1992. 14 s. 2027-92. Wares sewing and knittings. Terms and determinations. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy, 1992. 14 p. [in Ukrainian].

14. DSTU EN 131866:2010. Bilyzna postilna, napovнена perom i pukhom. Tekhnichni umovy. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2014. 10s. 131866:2010. Bed linen filled with peer and fuzz. Technical requirements. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2014. 10p. [in Ukrainian].

15. DK 004-2008. Ukrainyskiy klasyfikator normatyvnykh dokumentiv. [Ukrainian classifier of normative documents] legalexpert.in.ua/standarty-i-normativi/ministerstva-i-vedomstva/klassifikatory/raznoe/7735-dk-004-2008 Retrieved from <http://legalexpert.in.ua/standarty-i-normativi/ministerstva-i-vedomstva/klassifikatory/raznoe/7735-dk-004-2008> [in Ukrainian].

16. Natsionalnyi klasyfikator Ukrainy. Klyasyfikatsiia vydiv ekonomichnoi diialnosti (2012). [National classifier of Ukraine. Classification of types of economic activity]. registral.kiev.ua/kved.

<http://registral.kiev.ua/kved>.

17. Пояснення до УКТЗЕД. – Режим доступу: <http://www.customs.gov.ua/dmsu/control/uk/publish>.

18. Великий тлумачний словник сучасної української мови / Уклад. і голов. ред. В. Т. Бусел. – К.; Ірпінь. – ВТФ «Перун», 2004. – 1440 с.

19. ДСТУ ГОСТ 30332:2007. Вироби пір'яно-пухові. Загальні технічні умови. [Чинний від 2008-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – 16с.

20. ТУ У 17.4-14338122-033 – 2006. Вироби перо-пухові спальні. Ковдри та подушки. Технічні умови. – К., 2012. – 18 с.

21. Пугачевський Г. Ф. Теоретичне товарознавство / Г. Ф. Пугачевський. – 128 с.

22. Алексеев Н.С. Введение в товароведение непродовольственных товаров / Н.С. Алексеев, Ш.К. Ганцов. – М.: Экономика, 1982. – 184 с.

23. Shuo Fang Liu. Shape design of an optimal comfortable pillow based on the analytic hierarchy process method / Shuo Fang Liu, Yann Long Lee, Jung Chin Liang // Journal of Chiropractic Medicine, 2011. – December – C.12-24.

24. Umbach K. H. Physiological demands on duvets. Evaluation of sleep comfort. / Umbach K. H. // International Textile Research Centre. Hohenstein Institutes. – Germany, 2001. – №3– C.22-36.

25. Наповнювач для подушок – огляд і властивості, переваги і недоліки. – Режим доступу: <http://radka.in.ua/dim/napovnuvach-dlia-podyshok-ogliad-za.html>.

26. Який наповнювач для подушок найкращий - характеристики найбільш популярних матеріалів. – Режим доступу: <http://besida.in.ua/yakyj-napovnyuvach-dlya-podushok-najkrashhyj-harakterystyky-najbilsh-populyarnyh-materialiv.html>.

27. Який наповнювач купити для подушок? – Режим доступу: <https://www.ilady.in.ua/2016/10/napovnyuvach-dlja-podushky.html#2>.

28. Поліщук С. О. Біоцидна обробка постільних виробів / С. О. Поліщук, Г. М. Михайлова, Ю. В. Гілевич // Україна та ЄС: подолання технічних бар'єрів у торгівлі / Міжнародна науково-практична конференція. 18-19 березня 2015 р., м. Київ, КНТЕУ. – С. 189-192.

29. Михайлова Г. М. Спеціальна обробка текстильних наповнювачів для постільних

Retrieved from <http://registral.kiev.ua/kved> [in Ukrainian].

17. Poiasnennia do UKTZED [Explanation to Ukrainian classification of foreign economic activity]. www.customs.gov.ua/dmsu/control/uk/publish Retrieved from <http://www.customs.gov.ua/dmsu/control/uk/publish> [in Ukrainian].

18. Busel, V. T. (2004). Velykyi tлумachnyi slovnyk suchasnoi ukrainiskoi movy [Large explanatory dictionary of modern Ukrainian]. Irpin. VTF «Perun», 1440 p. [in Ukrainian].

19. DSTU HOST 30332:2007. Vyroby pir'iano-pukhovi. Zahalni tekhnichni umovy. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008. 16s. 30332:2007. Feather-fuzz wares. General technical requirements. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008. 16p. [in Ukrainian].

20. TU U 17.4-14338122-033–2006. Vyroby pero-pukhovi spalni. Kovdry ta podushky. Tekhnichni umovy. Kyiv, 2012. 18 s. 17.4-14338122-033–2006. Feather-fuzz wares. Blankets and pillows. Kyiv, 2012. 18p. [in Ukrainian].

21. Puhachevskiy, H. F. (2016) Teoretychne tovaroznavstvo [Theoretical merchandizing] 128p. [in Ukrainian].

22. Alekseev, N. S., Hantsov, Sh. K. (1982). Vvedeniye v tovarovedeniye neprodovolstvennykh tovarov. [Introduction to merchandizing of unfood commodities]. Moskov. Ekonomika, 184p. [in Russian].

23. Shuo Fang Liu. Shape design of an optimal comfortable pillow based on the analytic hierarchy process method / Shuo Fang Liu, Yann Long Lee, Jung Chin Liang // Journal of Chiropractic Medicine, 2011. – December – P.12-24. [in English].

24. Umbach K.H. Physiological demands on duvets. Evaluation of sleep comfort. / Umbach K. H. // International Textile Research Centre. Hohenstein Institutes. – Germany, 2001. – №3– P.22-36. [in English].

25. Napovniuvach dlia podushok – ohliad i vlastyvoli, perevahy i nedoliky [A filler for pillows is a review and properties, advantages and defects]. radka.in.ua/dim/napovnuvach-dlia-podyshok-ogliad-za.html. Retrieved from <http://radka.in.ua/dim/napovnuvach-dlia-podyshok-ogliad-za.html> [in Ukrainian].

26. Yakyi napovniuvach dlia podushok naikrashchy – kharakterystyky naibilsh populiarnykh materialiv. [What filler for pillows is the best are descriptions of the most popular materials]. besida.in.ua/yakyj-napovnyuvach-dlya-podushok-najkrashhyj-harakterystyky-najbilsh-populyarnyh-materialiv.html Retrieved from <http://besida.in.ua/yakyj-napovnyuvach-dlya-podushok-najkrashhyj-harakterystyky-najbilsh-populyarnyh-materialiv.html> [in Ukrainian].

27. Yakyi napovniuvach kupyty dlia podushok? [What filler to buy for pillows?]. www.ilady.in.ua/2016/10/napovnyuvach-dlja-podushky.html#2 Retrieved from <https://www.ilady.in.ua/2016/10/napovnyuvach-dlja-podushky.html#2> [in Ukrainian].

28. Polishchuk, S. O., Mykhailova, H. M., Hilevich, Yu. V. (2015). Biotsydna obrobka postilnykh vyrobiv. [Microbial-resistant treatment of bed wares]. Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia.Ukraina ta YeS: podolannia tekhnichnykh bar'ieriv u torhivli – International Scientific and Practical Conference. Ukraine and the EU: Overcoming Technical Barriers to Trade. Kyiv, KNTEU. – P.189-192.

29. Mykhailova, H. M., Hilevich, Yu. V. Spetsialna obrobka

речей/ Г. М. Михайлова, Ю. В. Гілевич // Актуальні проблеми теорії і практики експертизи товарів / III Міжнародна науково-практична інтернет-конференція. 16-18 березня 2016 р., м. Полтава, ПУЕТ. – С. 354-356.

30. Разбродин А. В. Унифікація предметів домашнього текстиля. Постельные принадлежности / А.В. Разбродин // Швейная промышленность. – 2015. – № 3. – С. 26-30.

tekstylnykh napovniuvachiv dlia postilnykh rechei. [The special treatment of textile fillers is for bed things]. Urgent issues of the theory and practice of commodity expertise. 4th International scientific and practical internet conference. – Aktualni problemy teorii i praktyky ekspertyzy tovariv. III mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsia. (pp. 354-356). Poltava: PUET [in Ukrainian].

30. Razbrodyn, A. V. (2015). Unyfykatsyia predmetov domashneho tekstyliia. Postelnye prynadlezhnosti. [Unitization of the articles of home Text. Bed belonging] Shveinaia promyshlennost – The sewing industry. Vol.3, S. 26-30.

SLIZKOV ANDRII

andrew.slizkov@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2693-7147

Department of Materials Science,

Commoditi Science and Textiles Examination,

Kiev National University of Technologies & Design

MYKHAILOVA HALYNA

michajlovagalina@ukr.net

ORCID: 0000-0002-1083-5875

Researcher ID: N-3285-2016

Department of Commodity science and customs affairs,

Kyiv National University of Trade and Economics

OSIIEVSKA VALENTYNA

osiiavska@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0077-9734

Researcher ID: N-3373-2016

Department of Commodity science and customs affairs,

Kyiv National University of Trade and Economics

**РАЗРАБОТКА НАУЧНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ СНА
С ОБЪЁМНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ НА ПРИМЕРЕ ПОДУШЕК**

СЛИЗКОВ А. Н.*, МИХАЙЛОВА Г. Н.*, ОСИЕВСКАЯ В. В.****

**Киевский национальный университет технологий и дизайна*

***Киевский национальный торгово-экономический университет*

Цель. Анализ существующих систем классификации постельных изделий и разработка научной классификации на примере одного вида – подушек.

Методика. Используются методы логического анализа, а также обобщения научной литературы и нормативных документов.

Результаты. Проанализирован перечень классификационных признаков подушек, которые используются для формирования их ассортимента. Представлено детальную классификацию подушек как иерархическую систему, где учитываются свойства подушек и связи между ними.

Научная новизна. Разработана научная классификация текстильных изделий для сна на примере одного вида – подушек.

Практическая значимость. Научная классификация текстильных изделия для сна определяет место этой группы товаров в разделе текстильных товаров, что положительно влияет на торгово-контрактные условия.

Ключевые слова: классификация, классификационные признаки, текстильные изделия для сна, подушки.

**DEVELOPMENT OF THE SCIENTIFIC CLASSIFICATION OF TEXTILE PRODUCTS FOR
SLEEP WITH VOLUME FILLERS ON THE EXAMPLE OF PILLOWS**

SLIZKOV A.*, МYKHAILOVA H. , OSHEVSKA V.****

**Kyiv National University of Technologies and Design*

***Kyiv National University of Trade and Economics*

Purpose. *An analysis of existing classification systems for bedding and the development of scientific classification on an example of one kind – pillows.*

Method. *Methods of logical analysis, generalization of scientific literature and normative documents are used.*

Results. *A list of classification characteristics of pillows used during the formation of their assortment is analyzed. A detailed classification of pillows is presented in the form of a hierarchical subsystem, which takes into account the peculiarity of pillows and regular connections between them.*

Scientific novelty. *The scientific classification of textile products for sleep on the example of one type – pillows is developed.*

Practical significance. *The scientific classification of textile products for sleep allows us to determine the place of this group of goods in the section of textile products, which improves the trade-contract conditions.*

Key words: *classification, classification features, textile products for sleep, pillows.*