



Автоматизація  
Технологічних і  
Бізнес  
Процесів






ISSN 2312-3125 (print)

ISSN 2312-931X (online)

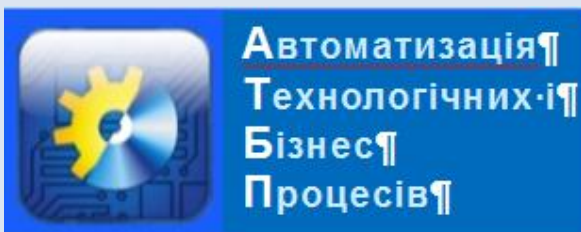
ISO 26324:2012

<http://www.atbp.onaft.edu.ua/>

## Автоматизація технологічних і бізнес-процесів Automation of technological and business-processes

-  Fiber optic level control system for high temperature fuel treatment systems
-  Influence of building automation and control systems on general energy efficiency indicators
-  Application of performance criteria of advanced exergetic analysis in decision making for energy efficiency improvement of wastewater source heat pump system
-  Review and comparative analysis of complex digital electrical metering devices used on modern merchant fleet
-  Development status and ways to improve automatic control systems for emitting parameters of DFB lasers





Автоматизація  
Технологічних і  
Бізнес  
Процесів

## Volume 12, Issue 2 /2020

ISSN 2312-3125 (print), ISSN 2312-931X (online)

УДК 681.5+66-933.6+338.364

### Головний редактор:

Артеменко С.В., д.т.н., проф. (Одеса)

### Почесний науковий консультант:

Хобін В.А., д.т.н., проф. (Одеса)

### Заступники головного редактора:

Котлик С.В., к.т.н., доц. (Одеса)

Сгоров В.Б., к.т.н. (Одеса)

### Редакційна колегія:

Монтік П.М., проф. (Одеса, Україна)

Князева Н.О., проф. (Одеса, Україна)

Плотніков В.М., проф. (Одеса, Україна)

Дорофеев Ю.І., доц. (Харків, Україна)

Тимченко В.Л., проф. (Миколаїв, Україна)

Жученко А.І., проф. (Київ, Україна)

Кіріченко Л.О., проф. (Харків, Україна)

Радівілова Т.А., доц. (Харків, Україна)

Коновенко Н.Г., доц. (Одеса, Україна)

Apostolos Korlos, prof. (Thessaloniki, Greece)



Журнал «Автоматизація технологічних і бізнес-процесів» було ініційовано до видання рішенням складу І Всеукраїнської науково – практичної конференції «Інформаційні технології та автоматизація – 2008», що відбулась у стінах Одеської національної академії харчових технологій та продовжує проводитися щорічно:

[www.itia.com.ua](http://www.itia.com.ua)

Журнал зареєстровано  
Міністерством Юстиції України  
Серія КВ №15895-4367Р від 16.10.2009 р.

Щоквартальний науково-виробничий журнал «Автоматизація технологічних і бізнес-процесів» включено до категорії "Б" Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук згідно наказу МОН України від 11.07.2019 № 975 «Про затвердження рішень атестаційної колегії міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 23 квітня 2019 року» за спеціальностями 122, 123, 151.

[www.atbp.onaft.edu.ua](http://www.atbp.onaft.edu.ua)

### Відповідальний редактор:

Бодюл О.С., к.т.н. (Одеса)

### Комп'ютерний дизайн та верстка:

Козуб О.О. (Одеса)

### Засновник:

Одеська національна академія харчових технологій

### Адреса редакції:

м. Одеса, вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039,  
тел.: (048)712-42-54, e-mail: journal.atbp@gmail.com

### Підписано до друку 02.06.2020 р.

Рекомендовано до друку та розташування в мережі  
Інтернет Вченою радою Одеської національної  
академії харчових технологій

02 червня 2020 р., протокол № 17

Відповідальність за достовірність інформації несе  
автор публікації.

Матеріали друкуються мовою оригінала.

Передрукування матеріалів журналу дозволяється  
лише за згодою редакції. Ліцензія СС-ВУ.

Надруковано у видавництві «Diol Print»

Тираж 101 прим.



## Volume 12, Issue 2 /2020

ISSN 2312-3125 (print), ISSN 2312-931X (online)

UDC 681.5+66-933.6+338.364

**Editor-in-chief:**

Artemenko S., prof. (Odessa, Ukraine)

**Honorary scientific consultant:**

Khobin V., prof. (Odessa, Ukraine)

**Deputy chief editors:**

Kotlyk S., PhD (Odessa, Ukraine)

Yehorov V., PhD (Odessa, Ukraine)

**Editorial Board:**

Montik P., prof. (Odessa, Ukraine)

Kniazieva N., prof. (Odessa, Ukraine)

Plotnikov V., prof. (Odessa, Ukraine)

Dorofieiev Y., PhD (Kharkiv, Ukraine)

Tymchenko V., prof. (Mykolayiv, Ukraine)

Zhuchenko A., prof. (Kiev, Ukraine)

Kirichenko L., prof. (Kharkiv, Ukraine)

Radivilova T., PhD (Kharkiv, Ukraine)

Konovenko N., PhD (Odessa, Ukraine)

Apostolos Korlos, prof. (Thessaloniki, Greece)

**Executive editor:**

Bodiul O.S., PhD (Odessa, Ukraine)

**Computer design and imposition:**

Kozub O.O. (Odessa, Ukraine)

**Founder:**

Odessa National Academy of Food Technologies

**Address of the editorial office:**

Ukraine, Odessa, Kanatnaya str, 112, 65039,

tel.: (048)712-42-54, e-mail:

journal.atbp@gmail.com

**It's sent for the press 19.06.2020.**

It's recommended for printing and publishing online by academic council of Odessa National Academy of Food Technologies

**02 June 2020, protocol № 17**

Articles are printed in original language

**It's allowed to use materials from the journal according to the Creative Commons license: CC-BY.**

It's printed in publishing house of Diol Print corp. (Odessa). Circulation is 101 copies.

Журнал реферується і індексується 14-ма провідними Світовими базами даних і індексними системами: EBSCO Information Services, ISSN, CrossRef, NBUV, Directory of Open Access Journals (DOAJ), ROAD, Google Scholar, OCLC WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE) ULRICHS WEB Global Serials Directory, Index Copernicus International.

Журналу присвоєно Міжнародний стандарт якості ISO 26324: 2012. Стандарт свідчить про те, що кожній статті опублікованій в нашому журналі в обов'язковому порядку присвоюється Міжнародний цифровий ідентифікатор DOI номер (Digital Object Identifier). Це в свою чергу гарантує, що доступ до матеріалу статті буде доступний для читачів незалежно від будь-якого роду форс-мажорних ситуацій.

Згідно з Міжнародними нормами журналу присвоєна ліцензія Creative Commons CC-BY Attribution, яка фіксує звіт правил щодо захисту авторських прав авторів. Для збільшення рівня цитованості статей, опублікованих в нашому журналі вченими з усього Світу, і, як наслідок, збільшення індексу цитування наших авторів, редакція журналу АТБП оформляє всі пристатейні списки літератури відповідно до IEEE Citation Style (стиль цитування Міжнародної асоціації Institute of Electrical and Electronics Engineers).



## ЗМІСТ

<b>Кір'язов І. М., Шестопапов С. В., Степанов М. Т., Хобін В. А.</b> Дослідження ефективності функціонування АСОЗ ПТЛ прийому зерна з залізничного транспорту на елеваторі «МКХП Орексім» м. Миколаїв .....	4
<b>Сандлер А.К., Батинський А.І.</b> Волоконно-оптичний пристрій контролю рівня для високотемпературних систем паливопідготовки .....	9
<b>Степанець О. В., Захарченко А. С.</b> Вплив автоматичної системи моніторингу та управління будівлею на загальні показники енергоефективності .....	13
<b>Некрасевич О. В., Волощук В.А., Ковриго Ю. М.</b> Застосування критеріїв поглибленого ексергетичного аналізу для обґрунтування рішень з підвищення енергетичної ефективності теплонасосної установки на стічних водах .....	21
<b>Гуров К. А., Савьолова Е. В., Ярмолевич В. Я., Езерович Д. М.</b> Огляд і порівняльний аналіз комплексних цифрових приладів, які використовуються на сучасних судах торгового флоту .....	29
<b>Похлебін Н. О., Мазур О. В., Ковальчук Д. А.</b> Стан розвитку та шляхи удосконалення систем автоматичного керування параметрами випромінювання DFB лазерів .....	34
<b>Борцова Ю. В., Плотніков В. М.</b> Аналіз комплексної моделі криптосистеми для захисту конфіденційних даних ...	41
<b>Левінський В.М., Левінський М.В.</b> Приклади аналізу сталих процесів в системі автоматичного регулювання засобами MATLAB .....	49

## CONTENT

<b>Kiryazov I. N., Shestopalov S. V., Stepanov M. T., Khobin V. A.</b> Research of the efficiency of functioning ALOS FTL receiving grain from rail transport at the elevator "Oreksim" in Mykolaiiv .....	4
<b>Sandler A.K., Batynskiy A I.</b> Fiber optic level control system for high temperature fuel treatment systems .....	9
<b>Stepanets O., Zakharchenko A.</b> Influence of building automation and control systems on general energy efficiency indicators .....	13
<b>Nekrashevych O., Voloshchuk V., Kovrigo Yu.</b> Application of performance criteria of advanced exergetic analysis in decision making for energy efficiency improvement of wastewater source heat pump system .....	21
<b>Gurov K. A., Savolova E. V., Yarmolovych V. Y., Ezerovych D. M.</b> Review and comparative analysis of complex digital electrical metering devices used on modern merchant fleet .....	29
<b>Pokhlebin N., Mazur O., Kovalchuk D.</b> Development status and ways to improve automatic control systems for emitting parameters of DFB lasers .....	34
<b>Bortsova Iu. V., Plotnikov V. M.</b> Analysis of a complex model of cryptosystem for protection of confidential data .....	41
<b>Levinskyi V. M., Levinskyi M. V.</b> Examples of steady state processes analysis in the automatic control system by MATLAB .....	49



УДК [621.867.3:622.612]:658.5

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АСОЗ ПТЛ ПРИЙОМУ ЗЕРНА З ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ НА ЕЛЕВАТОРІ «МКХП ОРЕКСІМ» М. МИКОЛАЇВ

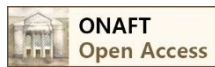
Кір'язов І. М.<sup>1</sup>, Шестопапов С. В.<sup>2</sup>, Степанов М. Т.<sup>3</sup>, Хобін В. А.<sup>4</sup>

Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, Україна

ORCID: <sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1297-5537>, <sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0238-8371>E-mail: <sup>1</sup> [ivan.kiryazov@se.ua](mailto:ivan.kiryazov@se.ua), <sup>2</sup> [stanislav.shestopalov@se.ua](mailto:stanislav.shestopalov@se.ua), <sup>3</sup> [stepanov197818@gmail.com](mailto:stepanov197818@gmail.com), <sup>4</sup> [khobin@onaft.edu.ua](mailto:khobin@onaft.edu.ua)

Copyright © 2020 by author and the journal "Automation of technological and business – processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i2.1801>

**Анотація.** У статті розглядаються результати функціонування в виробничих умовах автоматизованої системи оптимізації завантаження поточно транспортних ліній прийому зерна з залізничного транспорту на елеваторі «МКХП Орексім» у місті Миколаїв. Система призначена для формування потоку зерна одночасно з декількох вагонів розташованих на різних коліях та стабілізації продуктивності загального потоку зерна на заданому рівні, підвищення продуктивності та виведення її на максимально досяжну з урахуванням паспортних характеристик обладнання поточно транспортних ліній, зниження енерговитрат на перевантаження, запобігання аварійних ситуацій, пов'язаних з завалами зерна в баюшках норій. Автоматизована система оптимізації завантаження реалізує технології Leffol & Senumac які запатентовані SE Group International. Програмне забезпечення системи інтегровано в програмне забезпечення автоматизованої системи керування технологічними процесами елеватора і дозволяє оператору задавати компоненти потоку прийнятого зерна та початкову продуктивність поточно транспортних ліній, здійснювати вибір режиму керування їх завантаженням та вибір режиму завдання продуктивності поточно транспортних ліній в поточній технологічній ситуації, контролювати функціонування автоматизованої системи оптимізації завантаження. Результати порівняльного аналізу ефективності управління завантаженням при прийомі зерна з залізничних вагонів оператором «вручну» і з використанням автоматизованої системи оптимізації завантаження, проведені в 2020 році, показали наступне: середній час прийому зерна з залізничних вагонів з урахуванням простоїв зменшилось на 15%; середня продуктивність прийому зерна без урахування простоїв збільшилася на 10%. При цьому аварійних зупинок транспортного обладнання поточно транспортних ліній пов'язаних з завалами зерна протягом виробничих випробувань та опитної експлуатації не виникло.

**Abstract.** The article considers the results of functioning in production conditions of the automated loading optimization system of the flow-transport lines of reception of grain from railway transport on the elevator "NKHP Oresim" in the city of Nikolaev. The system is designed to generate the grain flow simultaneously from several cars located on different tracks and stabilize the productivity of the total grain flow at a given level, increase productivity and bring it to the maximum achievable taking into account the passport characteristics of flow-transport lines equipment, reduce energy consumption for overload, prevent emergency situations associated with grain debris in the boots of norias. Loading optimization system implements Leffol & Senumac technologies patented by SE Group International. The software of the system is integrated into the software of the automated process control system of the elevator and allows the operator to specify the components of the grain flow and the initial productivity of the flow-transport lines, select the flow-transport lines load control mode and select the flow-transport lines productivity setting mode in the current process situation, control the functioning of the loading optimization system. The results of a comparative analysis of the efficiency of load management during the unloading of railway cars by the operator "manually" and using an automated loading optimization system, conducted in 2020, showed the following: the average time of receive grain from railway cars, including idle time, decreased by 15%; the average shipping performance without any downtime increased by 10%. At the same time, there were no emergency stops of flow-transport lines transport equipment due to grain blockages during production tests and trial operation.

**Ключові слова:** прийом зерна, залізничний транспорт, поточно-транспортні лінії, продуктивність, енерговитрати, автомати-зована система оптимізації завантаження.

**Keywords:** grain reloading, railway transport, flow-transport lines, productivity, energy consumption, automated loading optimization system.



## Постановка задачі

Компанія S-engineering входить до холдингу SE Group International і займає лідируючі позиції в області автоматизації технологічних процесів зернопереробної галузі включаючи в свої проекти інноваційні розробки. Зокрема, компанія займається розробкою інноваційних систем автоматичної оптимізації завантаження поточно транспортних ліній (ПТЛ) зернових терміналів. Метою таких систем є підвищення продуктивності і запобігання аварійних зупинок ПТЛ, зниження питомих витрат електричної енергії на перевантаження. В [1-3] розглянуті концепція побудови, результати досліджень та виробничих випробувань таких систем. Розробка системи включає кілька етапів основним з яких є етап дослідження функціонування системи у виробничих умовах. На цьому етапі тестуються реалізовані алгоритми управління, остаточно перевіряється робота програмного забезпечення, розраховуються значення основних техніко-економічних показників роботи поточно транспортних ліній та визначається ефект від впровадження автоматизованої системи оптимізації завантаження (АСОЗ).

Ця стаття присвячена результатам дослідження ефективності функціонування АСОЗ ПТЛ прийому зерна з залізничного транспорту на елеваторі «МКХП Орексім» в м.Миколаїв.

## Призначення та функції АСОЗ

АСОЗ ПТЛ прийому зерна з залізничного транспорту, впроваджена на зерновому терміналі компанії Орек-сім (рис. 1) є інноваційною розробкою. Її мета - забезпечення прийому зерна одночасно з декількох залізничних вагонів, підвищення продуктивності ПТЛ, зниження енерговитрат на перевантаження, запобігання виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з завалами зерна в башмаках норій. АСОЗ реалізує технології Leffol & Senumac (L & S), запатентовані SE Group International [4-5].

Технологія LEFFOL [4]: спосіб контролю ступеня завантаження конвеєра / Method of Loading Efficiency Control. Суть технології - підвищення точності вимірювання завантаження всіх типів конвеєрів продуктом в процесі його транспортування без використання спеціалізованих датчиків, тільки за рахунок вимірювання струму навантаження приводного електродвигуна.

Технологія SENUMAC [5]: спосіб автоматичного керування завантаженням поточно-транспортних ліній си-пучих матеріалів / S-engineering Useful Model Method of Automatic Control of Process Shipping line upload of granular materials. Суть технології - автоматичне керування завантаженням поточно-транспортної лінії, що до-зволяють їй досягти максимально можливої продуктивності лінії, близьку до критичної, при якій починається процес розвитку завалів зерна в її норі. При цьому алгоритм управління гарантує запобігання цих завалів.

Функції, які реалізує АСОЗ:

1. Автоматичний розрахунок початкової швидкості конвеєрів, які приймають зерно, для швидкого і безава-рійного виведення норії на задану продуктивність.
2. Автоматична стабілізація продуктивності загального потоку зерна (завантаження ПТЛ).
3. Автоматичне запобігання аварійних зупинок ПТЛ через розвиток завалів зерна у башмаках норій.
4. Автоматичне виведення продуктивності ПТЛ на максимально досяжну в поточних умовах величину.
5. Автоматична швидка (після команди оператора) зміна продуктивності ПТЛ до одного з заданих рівнів.

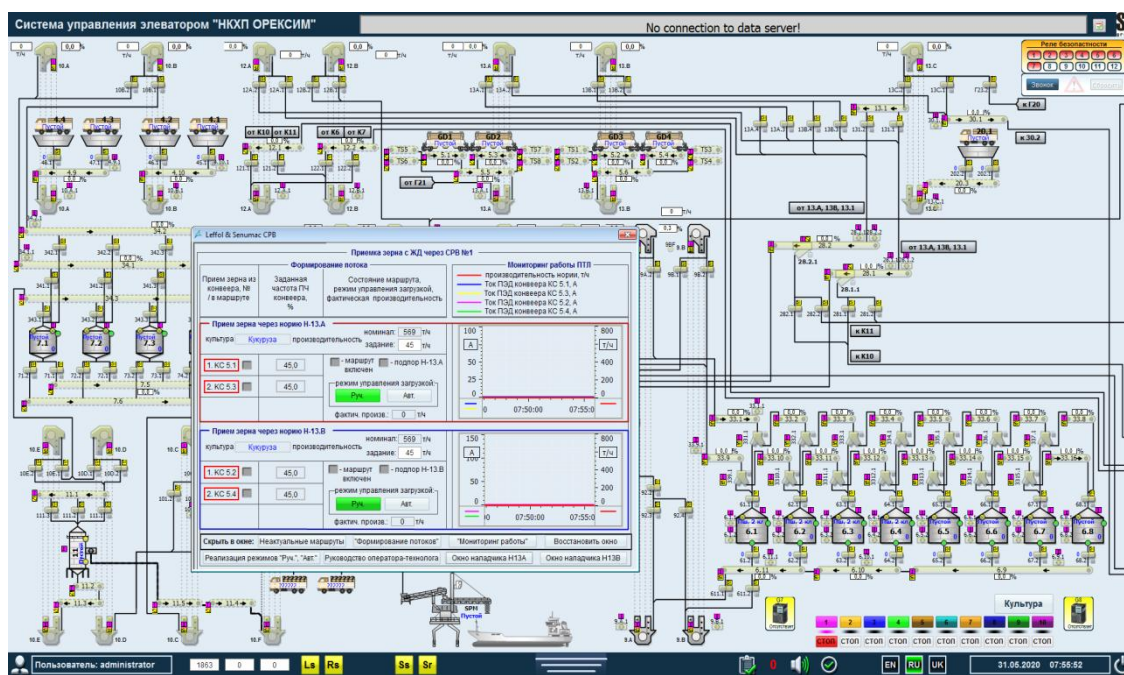


Рис. 1 – Вид основного екрана автоматизованого робочого місця оператора на зерновому терміналі компанії «МКХП Орексім» з фрагментом вікна графічного інтерфейсу для роботи з АСОЗ елеватора



Для взаємодії оператора з АСОЗ передбачено вікно графічного інтерфейсу оператора центрального диспетчерського пункту, див. рис.2, яке призначене для активації функцій, необхідних для управління процесом при-йому зерна з залізничного транспорту в сформованій виробничій ситуації. Воно забезпечує, на рівні диспетчер-ського управління, виконання оператором його функцій контролю і управління процесом прийому зерна.

К функціям оператора при роботі з АСОЗ ПТЛ відносяться:

- а) вибір (завдання) продуктивності ПТЛ;
- б) контроль за функціонуванням АСОЗ.

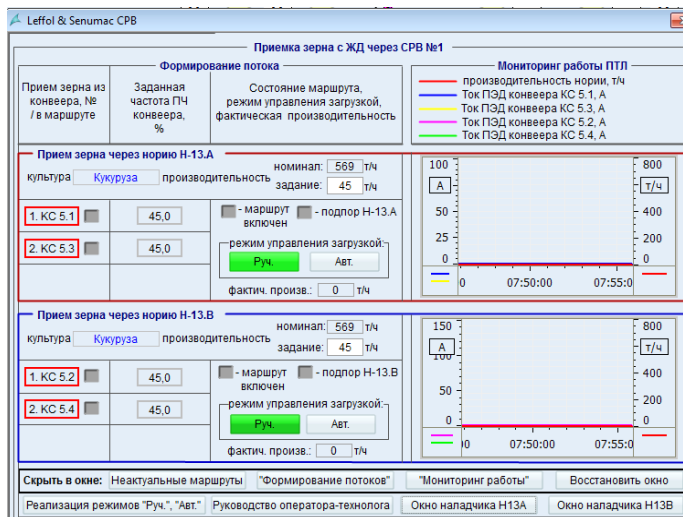


Рис. 2 – Вид вікна графічного інтерфейсу оператора для його роботи з АСОЗ

Вікно має дві функціонально орієнтовані частини, виділені спеціальною окантовкою з написами:

- ліва панель вікна: «Формування потоку»;

- права панель вікна: «Моніторинг роботи ПТЛ». «Формування потоку» є узагальненою назвою комплексу функцій управління і контролю, а саме: вибору режимів управління завантаженням ПТЛ, завдання продуктивності ПТЛ в поточній технологічній ситуації та контролю за функціонуванням АСОЗ.

### Результати виробничих випробувань АСОЗ

Для оцінки ефективності АСОЗ ПТЛ в 2020 році був проведений порівняльний аналіз ефективності керування завантаженням ПТЛ при прийомі зерна оператором «вручну» (управління завантаженням ПТЛ оператор здійснював зі свого автоматизованого робочого місця) і з використанням АСОЗ. У кожному разі розрахунок техніко-економічних показників роботи ПТЛ прийому зерна виконувався за результатами прийому десяти вагонів. Нижче представлені кілька діаграм зміни продуктивності ПТЛ при прийомі зерна з залізничних вагонів з використанням АСОЗ, що дозволяють візуально оцінити динаміку зміни продуктивності.

На рис. 3 представлена діаграма зміни продуктивності ПТЛ при прийомі зерна під керуванням АСОЗ. З графік видно, що система ефективно забезпечувала перехід із заданої продуктивності на іншу з компенсацією діючих збурень і забезпечує запобігання звалу башмака норії зерном при перевантаженні (продуктивність більше 700 т / год) в пусковому режимі.

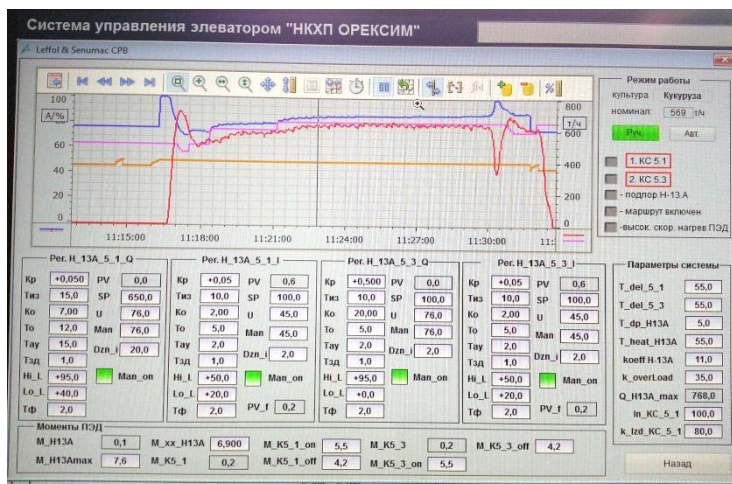


Рис. 3 – Вид вікна з діаграмою зміни продуктивності (т / год) ПТЛ при прийомі зерна з залізничних вагонів в «автоматичному» режимі із заданою продуктивністю 500, 600, і 650 т / год



На рис. 4 представлена діаграма зміни продуктивності ПТЛ при прийомі зерна під керуванням АСОЗ з заданим значенням продуктивності 650 т / год. Видно, що система швидко (менше 1 хв.) виводить продуктивність на задане значення і забезпечує високу динамічну і статичну точність стабілізації.

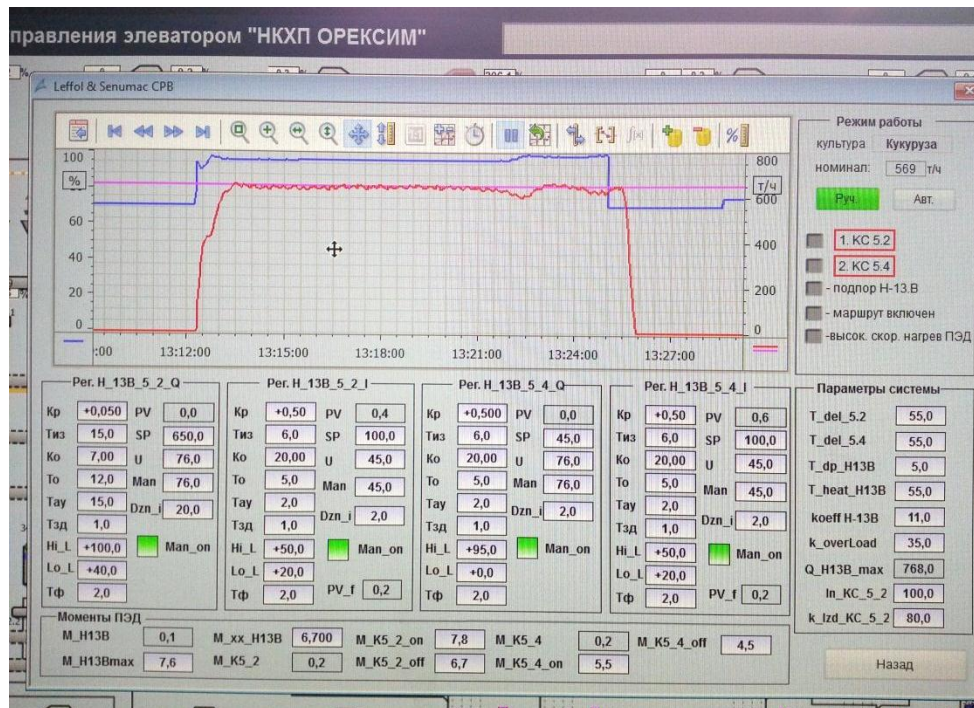


Рис. 4 – Вид вікна з діаграмою зміни продуктивності (т / год) ПТЛ при прийомі зерна з залізничних вагонів в «автоматичному» режимі із заданою продуктивністю 650 т / год

На рис. 5 представлена діаграма зміни продуктивності ПТЛ при прийомі зерна під керуванням АСОЗ з заданим значенням продуктивності 650 т / год.

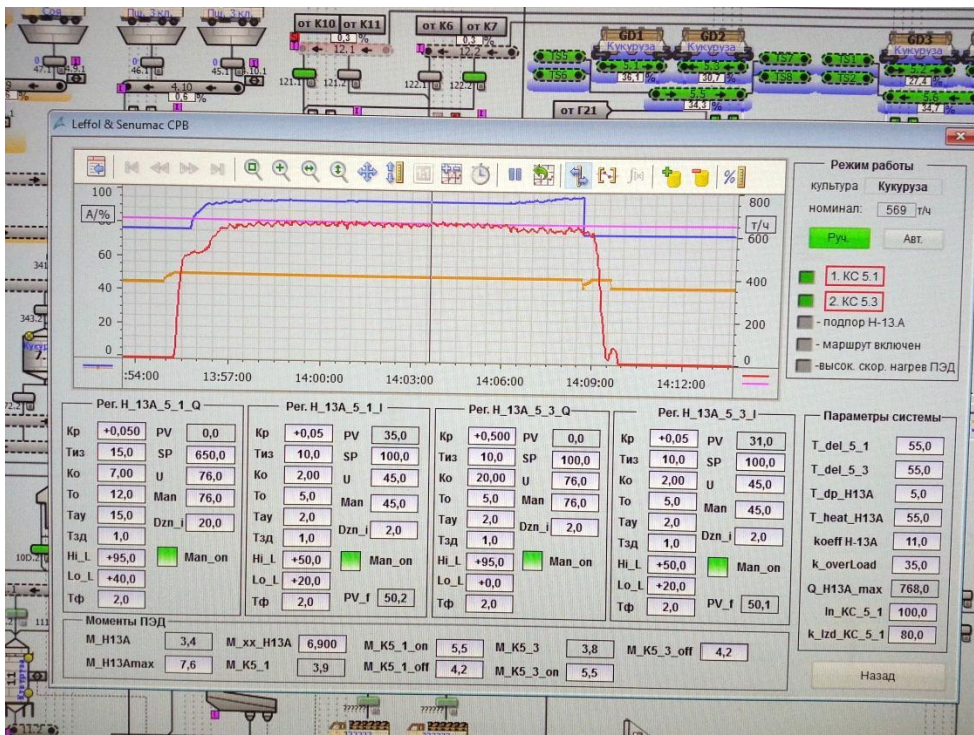


Рис. 5 – Вид вікна з діаграмою зміни продуктивності (т / год) ПТЛ при прийомі зерна з залізничних вагонів в «автоматичному» режимі із заданою продуктивністю 650 т / год



Середня продуктивність досить висока (вище номінальної на 15%), задане значення забезпечується навіть на етапі закінчення зерна в приймальному бункері.

### Висновок

Результати порівняльного аналізу ефективності управління завантаженням ПТЛ при прийомі зерна з залізничних вагонів оператором «вручну» і з використанням АСОЗ, проведені в 2020 році, показали наступне:

- середній час прийому з урахуванням простоїв на зміну групи вагонів зменшилася на 15%;
- середня продуктивність прийому без обліку простоїв збільшилася на 10%.

При цьому, в сталих режимах АСОЗ забезпечує середню продуктивність близько 650 т / год, в перехідних – виведення ПТЛ на максимальне завантаження займає менше однієї хвилини. Останнє пояснюється тим, що перехідні процеси в АСОЗ налаштовані так, щоб гарантовано забезпечити безпечні (без завалів і аварійних відключень ПТЛ) і швидкі пускові режими ПТЛ в будь-яких виробничих ситуаціях.

Джерела підвищення ефективності роботи ПТЛ при застосуванні АСОЗ:

- скорочення часу роботи ПТЛ зі зниженою продуктивністю за рахунок безперервного управління швидкістю конвеєрів які приймають зерно та стабілізують завантаження ПТЛ;
- максимізація продуктивності ПТЛ до її гранично допустимих значень, що визначаються паспортними характеристиками обладнання;
- скорочення часу роботи ПТЛ зі зниженою продуктивністю в режимах пуску ПТЛ та цілеспрямованої зміни її продуктивності за рахунок значного скорочення часу перехідних процесів;
- гарантоване запобігання аварійних зупинок ПТЛ через їх перевантаження зерном і їх негативних наслідків.

### Список використаних джерел

- [1] Хобин В. А. Концепция эффективного управления производительностью поточно-транспортных линий при перегрузке зерна / В. А. Хобин, С. В. Шестопапов // Хранение и переработка зерна. – Днепропетровск, 2011. – № 10 (148). – С. 26–29.
- [2] Шестопапов С. В. Оптимизация производительности процесса перегрузки зерна в условиях ограничения типа «аварийная ситуация» / С. В. Шестопапов, В. А. Хобин // XVIII Міжнарод. конф. з автомат. управління «Автоматика – 2011». – Львів, 2011. – С. 194–195.
- [3] Кирьязов И. Н. Автоматизированная система оптимизации загрузки поточно-транспортных линий перегрузки зерна: итоги производственных испытаний / И. Н. Кирьязов, С. В. Шестопапов // Хранение и переработка зерна. – Днепропетровск, 2013. – № 7 (172). – С. 43–46.
- [4] Пат. на винахід 99525 Україна, МПК (2011.01), B65G 17/00, G01R 29/00. Спосіб контролю ступеня завантаження конвеєра / Аннаєв Б. С., Герасимов В. В., Хобин В. А., Кирьязов И.Н., Шестопапов С. В. и др.; власник ТОВ «С-Інжинірінг». – № a201014455; заявл. 03.12.10; опубл. 25.05.12, Бюл. № 10. – 14 с.
- [5] Пат. на винахід 95887 Україна, МПК (2011.01), B65G 17/00, B65G 47/46 (2006.01), B65G 65/42 (2006.01), G01G 11/12 (2006.01). Спосіб автоматичного управління завантаженням потоково-транспортної лінії сипких матеріалів / Аннаєв Б. С., Герасимов В. В., Хобин В. А., Кір'язов І. М., Шестопапов С. В. і ін.; власник ТОВ «С-Інжинірінг». – № a201015861; заявл. 29.12.10; опубл. 12.09.11, Бюл. № 17. – 24 с.

### References

- [1] V. A. Khobin and S. V. Shestopalov, “Kontseptsiya effektivnogo upravleniya proizvoditelnostyu potочно-transportnykh liniy pri peregruzke zerna,” *Hranenie i pererabotka zerna*, 10 (148), pp. 26-29, Oct. 2011.
- [2] S. V. Shestopalov and V. A. Khobin, “Optimizatsiya proizvoditelnosti protsessu peregruzki zerna v usloviyah ogranicheniya tipa “avariynaya situatsiya,” in *VIII Mizhnar. konf. z avtomat. upravlinnia “Avtomatika – 2011”*, LvIv, Ukraine, 2011, pp. 194–195.
- [3] I. N. Kiryazov and S. V. Shestopalov, “Avtomatizirovannaya sistema optimizatsii zagruzki potочно-transportnykh liniy peregruzki zerna: itogi proizvodstvennykh ispytaniy,” *Hranenie i pererabotka zerna*, 7 (172), pp. 43-46.
- [4] B. S. Annaev *et al.*, “Sposib kontroly zavantazhennya konveera,” Ukraine Patent na vynahid 99525, Biul. no. 10, 14 p., 25 May, 2012.
- [5] B. S. Annaev *et al.*, “Sposib avtomatichnogo upravlinnia zavantazhenniam potokovo-transportnoi linii syppykh materialiv,” Ukraine Patent na vynahid 95887, Biul. no. 17, 24 p., 12 Sept., 2011.



УДК 56.028.2 (075.8)

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ ТОПЛИВОПОДГОТОВКИ

Сандлер А.К.<sup>1</sup>, Батынский А.И.<sup>2</sup>Национальный университет «Одесская морская академия», г. Одесса, Украина  
e-mail: <sup>1</sup>albertsand4@gmail.com, <sup>2</sup>anbat99@ukr.net

Copyright © 2020 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i2.1802>

**Анотація.** Для збереження своєї присутності на ринку судновласники змушені шукати шляхи істотного скорочення власних витрат з тим, щоб не тільки конкурувати з іншими судновласниками, а й забезпечити рівень доходів, який би створював умови для розширеного відтворення. Судноплавні компанії реалізують скорочення власних фінансових витрат різними шляхами, наприклад зниженням заробітних плат екіпажу, скороченням кількості екіпажу на судні, зниження основних експлуатаційні витрат за рахунок переходу на дешеві сорти високов'язких палив в'язкістю понад 380 мм кв./с. Один з перспективних методів зниження фінансових витрат є перехід на шлях оптимізування енергоспоживання і підвищення енергоефективності судів. Удосконалення енергетичної ефективності судна передбачає виконання регулювання параметрів основних елементів паливної системи і мінімізацію енергетичних витрат на підготовку важкого палива. Аналіз застосування існуючих рівнемірів пока-зав, що їх застосування в спеціальних експлуатаційних умовах характеризується недостатньою достовірністю результатів вимірювання, високою похибкою, низькою оперативністю, припускають контакт з паливом, не забезпечують умов безпеки при роботі з вуглеводнями. Для пошуку шляхів поліпшення метрологічних характе-ристик пристроїв контролю рівня були проаналізовані конструкції поширених вимірювальних приладів. Ро-зроблено новий схемотехнічне рішення рівнеміра для контролю високотемпературних середовищ. У пристрої немає необхідності застосування додаткових заходів по захисту чутливого елемента в умовах впливу експлу-таційних факторів, є можливість обліку і компенсації коливаний температури контрольованого середовища і од-ночасно збережені надійність, чутливість і простота схемотехнік пристроїв відомих типів. Основною відмінністю пропонованого пристрою є те, що генератор коливання винесено із зони підвищених температур, стрижень з інвара розташований коаксіально до комбінованого световоду з єдиною оболонкою і багатьма сер-цевинами. Комбінований світловод захищений оболонкою з інвара. Випромінювання до световоду надходить від джерела випромінювання через первинний розгалужувач, мультиплексор / демультіплексор, вторинний розгалужувач. Після проходу світловода випромінювання, відбившись від дзеркальних шарів на кінцях серце-вин, повертається в зворотному порядку до фотоприймача. Використання розробленого пристрою дозволить не тільки адекватно і достовірно оцінювати кількісний показник рівня в судових системах паливопідготовки на належному рівні, а й контролювати витрату палива енергетичною установкою.

**Abstract.** To maintain their presence in the market, ship-owners are forced to look for ways to significantly reduce their own costs in order not only to compete with other ship-owners, but also to ensure a level of income that would create conditions for expanded reproduction. Shipping companies realize reductions in their own financial costs in various ways, for example, reducing crew wages, reducing the number of crew on board, and reducing basic operating costs by switching to cheap varieties of high-viscosity fuels with viscosities higher than 380 mm<sup>2</sup>/s. One of the promising methods of reducing financial costs is the transition to the path of optimizing energy consumption and improving the energy efficiency of ships. Improving the energy efficiency of the vessel involves adjusting the parameters of the main elements of the fuel system and minimizing the energy costs of preparing heavy fuel. Analysis of the use of existing level gauges showed that their use in special operating conditions is characterized by insufficient reliability of the measurement results, high error, low efficiency, suggest contact with the fuel, do not provide safety conditions when working with hydrocarbons. To search for ways to improve the metrological characteristics of level control devices, the designs of common measuring instruments were analyzed. A new circuitry solution for a level gauge for monitoring high-temperature environments has been developed. The device does not require additional measures to protect the sensitive element under the influence of operational factors, it is possible to take into account and compensate for temperature fluctuations in the controlled environment, and at the same time,



*the reliability, sensitivity and simplicity of the circuit-technical solutions of known types of devices are preserved. The main difference of the proposed device is that the oscillation generator is removed from the zone of elevated temperatures, the Invar rod is located coaxially to the combined fiber with a single sheath and many cores. The combined light guide is protected by an invar sheath. The radiation to the fiber comes from the radiation source through the primary splitter, multiplexer / demultiplexer, secondary splitter. After the fiber passes, the radiation, reflected from the mirror layers at the ends of the cores, returns in the reverse order to the photodetector. Using the developed device will allow not only to adequately and reliably assess the quantitative level indicator in ship fuel preparation systems at the proper level, but also to control fuel consumption by a power plant.*

**Ключові слова:** рівнемір, паливо, світловод.

**Keywords:** level gauge, fuel, optical fiber.

### Введение

В современных рыночных условиях морские и речные судоходные компании, основную материальную базу которых составляет транспортный флот, испытывают серьёзные экономические и финансовые трудности в конкурентной борьбе на мировом рынке транспортных услуг. Большинство транспортных судов эксплуатируются 10-20 лет судоходными компаниями.

Для сохранения своего присутствия на рынке судовладельцы вынуждены искать пути существенного сокращения собственных затрат с тем, чтобы не только конкурировать с другими судовладельцами, но и обеспечить уровень доходов, который бы создавал условия для расширенного воспроизводства. Судоходные компании реализуют сокращения собственных финансовых затрат различными путями, например снижением заработных плат экипажу, сокращением количества экипажа на судне, снижением основных эксплуатационных затрат за счет перехода на дешевые сорта высоковязких топлив вязкостью выше 380 мм<sup>2</sup>/с. Один из перспективных методов снижения финансовых затрат является переход на путь оптимизирования энергопотребления и повышения энергоэффективности судов.

С 1 января 2013 года в соответствии с положениями Резолюции ИМО МЕРС.203(62) вступили в силу новые правила Конвенции МАРПОЛ, направленные на повышение энергоэффективности судов. На все новые суда, построенные после 1 января 2013 года, распространяются требования по расчету Конструктивного коэффициента энергоэффективности судна, а для судов, находящихся в эксплуатации, с этой даты вводится требование по наличию на борту Судового плана управления энергетической эффективностью судна.

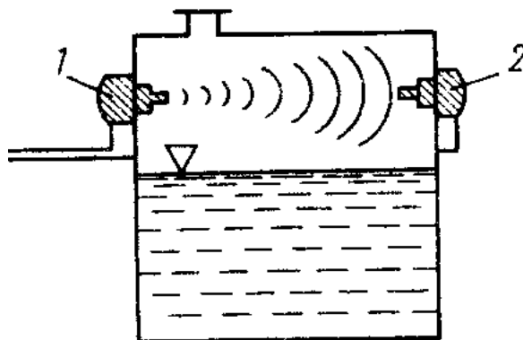
Совершенствование энергетической эффективности судна предполагает выполнение регулировки параметров основных элементов топливной системы и минимизацию энергетических затрат на подготовку тяжелого топлива [1, 2]. Одним из аспектов минимизации энергетических затрат является повышение точности и достоверности измерения уровня топлива в топливных танках и передача результатов в информационно-измерительную систему судна. Задача измерения уровня жидкости является актуальной не только на судах. Стремление топливных компаний-операторов точно учитывать запасы углеводородных топлив заставляет искать новые высокоточные приборные методы измерения уровня.

### Анализ литературных источников и постановка задачи

Анализ применения существующих уровнемеров показал, что их применение в специальных эксплуатационных условиях характеризуется недостаточной достоверностью результатов измерения, высокой погрешностью, низкой оперативностью, предполагают контакт с топливом, не обеспечивают условий безопасности при работе с углеводородами.

Для поиска путей улучшения метрологических характеристик устройств контроля уровня были проанализированы конструкции распространенных измерительных приборов [3, 4].

Известное устройство, которое состоит из блока питания, пьезоэлектрического генератора ультразвуковых колебаний, приемника ультразвуковых колебаний и усилителя (рис. 1) [3].



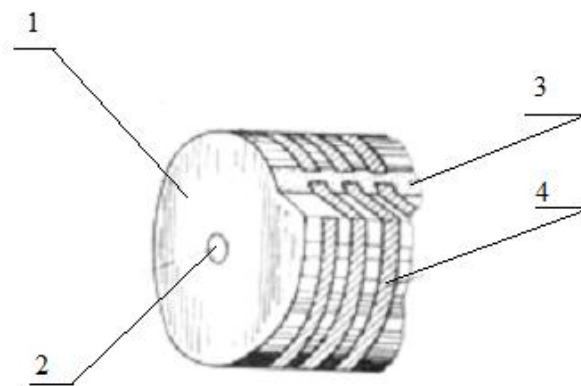
**Рис. 1. – Ультразвуковой сигнализатор уровня:  
1 – излучатель; 2 - приемник**



Недостатки устройства, которые обусловлены применением пьезоэлектрических элементов в приборе:

- 1) зависимость достоверности измерения от температуры контролируемой среды, в том числе частичная потеря работоспособности при приближении температуры к температуре точки Кюри пьезокристалла;
- 2) необходимость постоянной защиты и поддержания геометрии измерительного тракта в условиях влияния эксплуатационных факторов;
- 3) сложность замены поврежденных узлов измерительного устройства в условиях повышенных температур;
- 4) большая стоимость прибора.

Наиболее близким за технической сущностью к решению задачи эффективного контроля уровня высокотемпературных топлив является устройство, которое содержит блок питания, пьезоэлектрический генератор ультразвуковых колебаний и волоконный световод с внешними и внутренними электродами (рис. 2) [4].



**Рис. 2. Волоконно-оптический сигнализатор уровня:**  
1 - оболочка; 2 – жила; 3 – внутренний электрод; 4 – внешний электрод

Недостатки устройства, которые обусловлены применением одного световода с внешними и внутренними электродами:

- чрезмерные сложности при вводе акустической волны в одиночный световод;
- недостаточная эффективность модуляции излучения в световоде;
- необходимость применения дополнительных мер по защите зоны контакта электродов и световода в условиях влияния эксплуатационных факторов;
- невозможность учета влияния эксплуатационных факторов на результаты измерения.

#### **Цель и задачи исследования**

Таким образом, возникла необходимость разработки нового схмотехнического решения уровнемера для контроля высокотемпературных сред. Представлялось целесообразным создание измерительного устройства, в котором отсутствует необходимость применения дополнительных мер по защите чувствительного элемента в условиях влияния эксплуатационных факторов, имеется возможность учета и компенсации колебаний температуры контролируемой среды и одновременно сохранены надежность, чувствительность и простота схмотехнических решений устройств известных типов.

Основным отличием предлагаемого устройства является то, что генератор колебания вынесен из зоны повышенных температур, стержень из инвара расположен коаксиально к комбинированному световоду с единой оболочкой и многими сердцевинами. Комбинированный световод защищен оболочкой из инвара. Излучение к световоду поступает от источника излучения чрез первичный разветвитель, мультиплексор/ демультиплексор, вторичный разветвитель. После прохода световода излучение, отразившись от зеркальных слоев на концах сердцевин, возвращается в обратном порядке к фотоприемнику.

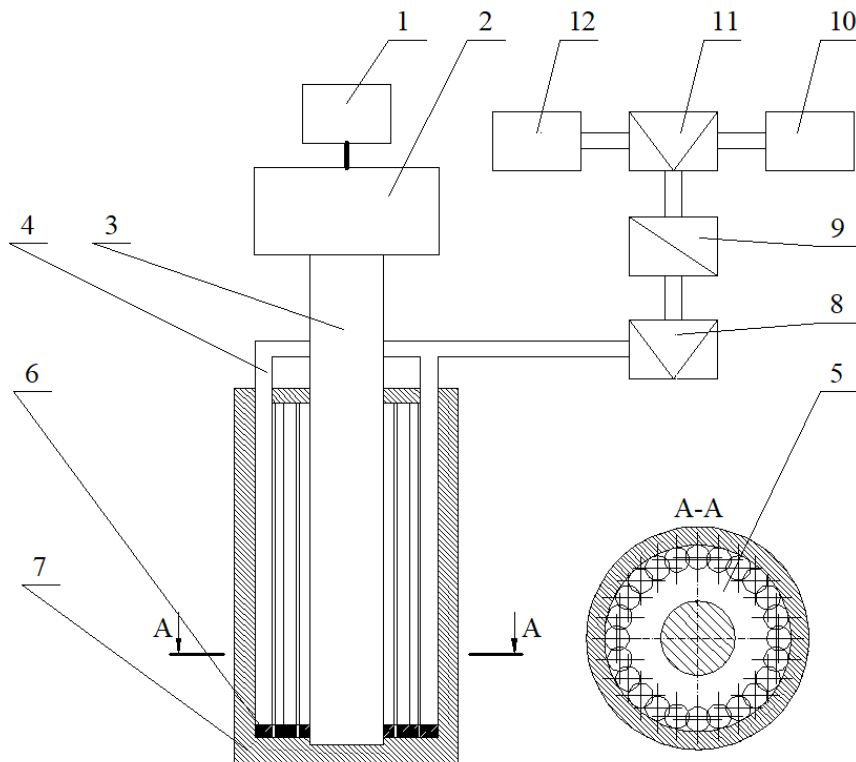
#### **Результаты исследований**

Суть устройства объясняется чертежом (рис. 3).

Излучение поочередно поступает в сердцевинки комбинированного световода, которые находятся в пределах прибора. Одновременно на сердцевинки влияют колебания сверхвысокой частоты, которые создаются генератором и транслируются стрелом.

В статическом режиме (калибровка без погружении в высокотемпературную среду) генерируется информационный сигнал, на основании которого фиксируются соответствующие данные и поправки при стандартных условиях окружающей среды и потери во всех элементах измерительной системы.

В динамическом режиме (измерение после погружения в высокотемпературную среду) при изменении величины погружения измерителя в топливо, на границе "топливо-воздух" происходит резкое изменение величины демпфирования вынужденных колебаний сердцевин комбинированного световода, который возбуждается условия акустооптического взаимодействия механических и световых волн.



**Рис. 3. – Измеритель уровня для высокотемпературных систем топливоподготовки:**

1 – блок питания; 2 – генератор колебаний сверхвысокой частоты; 3 – стержень из инвара; 4 – сердцевины комбинированного световода; 5 – оболочка комбинированного световода; 6 – зеркальные слои на концах сердцевин; 7 – защитная оболочка из инвара; 8 – вторичный разветвитель; 9 – мультиплексор/ демultipлексор; 10 – источник излучения; 11 – первичный разветвитель; 12 – фотоприемник.

Величина интенсивности светового излучения, которое проходит везде сердцевины в прямом и обратном направлении, после отражения от зеркального слоя, будет пропорциональная величине уровня контролируемого среды [5 - 9].

Таким образом, происходит полный цикл измерения.

#### **Выводы**

Технический эффект достигается благодаря тому, что комбинация оптико-механических элементов обеспечивает:

1. повышение качества функционирования за счет расположения сенсорного элемента измерителя непосредственно в среде топлива, уровень которой измеряется, и выноса генератора колебаний в зону умеренных температур;
2. компенсацию влияния неконтролируемых эксплуатационных и климатологических факторов на измерительный канал;
3. применение материалов, нечувствительных к термическому и коррозионному влиянию топлива с температурой свыше 400 К;
4. постоянное измерение в реальном масштабе времени;
5. повышенную чувствительность и точность прибора.

Использование разработанного устройства позволит не только адекватно и достоверно оценивать количественный показатель уровня в судовых системах топливоподготовки на надлежащем уровне, но и контролировать расход топлива энергетической установкой.

#### **Список использованных источников**

- [1] Добровольский В. В., Солодовников В. Г. Энергетическая эффективность топливных систем современных транспортных судов работающих на высоковязких сортах тяжелых топлив вязкостью 380 мм<sup>2</sup>/с и выше. // Судовые энергетические установки. – Одесса: ОНМА. – 2013. – Вып. 32. – С. 101 - 112.
- [2] Справочник судового механика по теплотехнике / И.Ф. Кошелев, А.П. Пимошенко, Г.А. Попов, В.Я. Тарасов. – Л.: Судостроение, 1987. – 480 с.
- [3] Измерения в промышленности. Справ. изд. В 3 кн. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура. Пер. с нем. / Под ред. Профоса П. – 2 изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990 – 384 с.



- [4] Гуляев, Ю.В., Меш, М.Я., Проклов, В.В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. – М.: Радио и связь, 1991. – 150 с.
- [5] Бусурин, В.И., Носов, Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
- [6] Удд, Э. Волоконно-оптические датчики. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
- [7] Снайдер, А., Лав, Д. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
- [8] Черненко, В.Д. Оптомеханика волоконных световодов. – СПб: Политехника, 2010. – 291 с.
- [9] Сандлер, А.К. Інформаційно-вимірювальні пристрої на основі волоконно-оптичних технологій. – Одеса: Издатинформ НУ "ОМА", 2018. – 165 с.

### References

- [1] Dobrovolsky, V.V., Solodovnikov, V.G. (2013). Energeticheskaya effektivnost' toplivnykh sistem sovremennykh transportnykh sudov rabotayushchikh na vysokovyazkikh sortakh tyazhelykh topliv vyazkost'yu 380 mm<sup>2</sup>/s i vyshe - Energy efficiency of the fuel systems of modern transport vessels operating on high-viscosity grades of heavy fuels with a viscosity of 380 mm<sup>2</sup>/s and higher. // Sudovyie energeticheskiye ustanovki - Marine power plants. [in Ukraine].
- [2] Koshelev, A.P. Pimoshenko, G.A. Popov, V.Ya. Tarasov. (1987). Spravochnik sudovogo mekhanika po teplotekhnike. [Handbook of ship mechanics in the heat-technical industry]. Leningrad: Sudostroyeniye [in Russian].
- [3] Profos P. (1990). Izmereniya v promyshlennosti. [Measurements in the industry]. Moscow: Metallurgy [in Russian].
- [4] Gulyaev, Yu.V., Mesh, M.Ya., Proklov, V.V. (1991). Modulyatsionnyye efekty v volokonnykh svetovodakh i ikh primeneniye. [Modulation effects in optical fibers and their application]. Moscow: Radio i svyaz' [in Russian].
- [5] Busurin, V.I., Nosov, YU.R. (1990). Volokonno-opticheskiye datchiki. Fizicheskiye osnovy, voprosy rascheta i primeneniya. [Fiber optic sensors. Physical basis, questions of calculation and application]. Moscow: Energoatomizdat [in Russian].
- [6] Udd, E. (2008). Volokonno-opticheskiye datchiki. [Fiber Optic Sensors]. Moscow: Tekhnosfera [in Russian].
- [7] Snider, A., Love, J.D. (1987.) Teoria opticheskikh volnovodov. [Theory of optical wave guides]. Moscow: Radio i svyaz' [in Russian].
- [8] Chernenko, V.D. (2010). Optomekhanika volokonnykh svetovodov. [Optomechanics of optical fibers]. St. Petersburg: Polytechnic [in Russian].
- [9] Sandler, A.K. (2018). Informatsiyno-vymiryuval'ni prystroyi na osnovi volokonno-optychnykh tekhnolohiy. [Information-measuring devices based on fiber-optic technologies]. Odessa: Izdatinform NU "OMA" [in Ukraine].

УДК 681.58

## ВПЛИВ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА УПРАВЛІННЯ БУДІВЛЕЮ НА ЗАГАЛЬНІ ПОКАЗНИКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Степанець О. В.<sup>1</sup>, Захарченко А. С.<sup>2</sup>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
м. Київ, Україна

ORCID: <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4444-0705>, <sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5767-3028>

E-mail: <sup>1</sup> o.stepanets@kpi.ua, <sup>2</sup> zakharchenko.nastia.s@gmail.com

Copyright © 2020 by author and the journal "Automation of technological and business - processes.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i2.1804>

*Анотація.* В статті розглядається питання енергоефективності в контексті сучасної будівлі, беручи до уваги як і економічні показники, так і екологічні характеристики та особистий комфорт користувачів. Зазначено



актуальність вказаного напрямку в Україні, структуру енергоспоживання та потенціал в сфері енергоефективності з огляду на вже існуючі результати. Переглянуто нормативні документи та нормативно-правові акти, включно з Законом України «Про енергетичну ефективність будівель», що визначають вимоги до будинків, процедури сертифікації, енергетичного аудиту та фіксують пріоритетні напрямки розвитку держави. Вказується принцип визначення доцільного рівня енергоефективності та його залежності від низки технічних, соціальних та економічних параметрів, де перевага надається впровадженню комплексних енергозберігаючих рішень з необхідністю забезпечення рівномірного впливу на характеристики будівлі та її інженерні системи для досягнення найвищого результату. У статті розглянуто особливості систем автоматизації сучасних будівель, пов'язані з їх розподілом на класи енергоефективності та відповідних наборів характеристик та функцій, що мають бути реалізованими. Також описано методи оцінки впливу системи на енергоефективність будівлі та орієнтовні очікувані економічні вигоди для кожного з визначених класів. Переглянуто параметри та явища, що можуть спотворювати ці результати. Аналіз будівлі дозволяє визначити оптимальну структуру і функції системи автоматизації для скорочення необхідних витрат або більш раціональному використанні матеріальних ресурсів. В результаті визначено перспективний напрямок розвитку галузі автоматизації будівель, посилюючись на отриману інформацію, їх вплив на параметри та роль в показниках енергоспоживання будівлі.

**Abstract.** The article discusses the issue of energy efficiency in the context of a modern building, taking into account both economic indicators and environmental performance and personal comfort of users. The relevance of the indicated direction in Ukraine, the structure of energy consumption and the potential in the field of energy efficiency are noted given the already existing results. Regulatory documents and legal acts, including the Law of Ukraine "On Energy Efficiency of Buildings", defining the requirements for buildings, certification procedures, energy audit and fixing the priority directions of the state development were reviewed. We set out the principle of determining the appropriate level of energy efficiency and its dependence on some technical, social and economic parameters, where the priority is given to the implementation of complex energy-saving solutions, with the need to ensure a uniform impact on the characteristics of the building and its engineering systems to achieve the highest result. The article discusses the features of modern building automation systems related to their division into energy efficiency classes and the corresponding sets of characteristics and functions to be implemented. It also describes methods for assessing the impact of the system on the energy performance of the building and the estimated expected economic benefits for each of the classes identified. Parameters and phenomena that may distort these results are reviewed. Building analysis allows you to determine the optimal structure and function of the automation system to reduce the necessary costs or more rational use of material resources. As a result, the perspective direction of development of the building automation industry was determined, referring to the information received, their influence on the parameters and the role in the energy consumption indicators of the building.

**Ключові слова:** автоматизація будівель, енергоефективність, моніторинг, класи енергоефективності, АСМУБ, енергозбереження.

**Keywords:** building automation, energy efficiency, monitoring, energy efficiency classes, BACS, energy saving.

## Вступ

Дуже часто можна почути термін «енергоефективність». І це не дивно, адже витрати енергії в усіх галузях промисловості та побуту зросли. Зросли і об'єми виробництва продукції і різноманіття товарів, необхідних для повсякденного життя. Тому в світі постійно вдосконалюються техніка та матеріали для зменшення використання як первинних енергоносіїв так і електроенергії, зменшення викидів CO<sub>2</sub>, охорони довкілля, зменшення собівартості продукції і тому подібне.

Розвиток технологій та потреб сучасної людини безпосередньо впливають на все що пов'язано з будівлями, дозволяючи створювати більш екологічні, енергоефективні та дешеві в експлуатації об'єкти, зберігаючи рівень комфорту, що стає стандартом для забудовників в світі та підкріплюється міжнародними домовленостями (Київський протокол, Паризька угода, директива про енергоефективність будівель від Європейського Союзу тощо [1]).

## Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В Україні питання енергоефективності постало особливо гостро тільки декілька років тому, коли відбулося різке підняття тарифів на енергоносії (рис. 1) [1], що стало економічним ударом не тільки для промисловості країни та комерційних установ, а й для звичайного населення.

Не зважаючи на величезний потенціал України в сфері енергоефективності, на сьогоднішній день вона є однією з найбільш енергоємних країн у світі [2]. Така ситуація пов'язана з рядом факторів:

- відносно низькі ціни на енергоносії;
- надмірне регулювання ринку за рахунок надання значних субсидій та державне регулювання цін;
- низька поінформованість населення;
- недостатнє фінансування тощо.

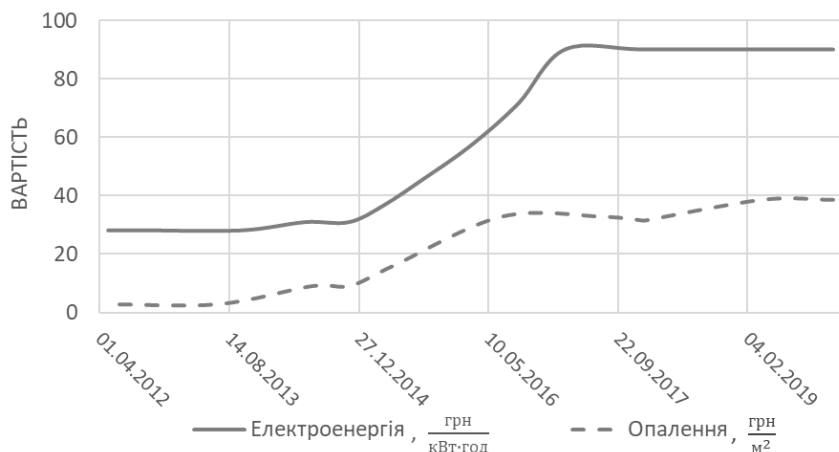


Рис. 1 – Динаміка тарифів в Україні

Значна частинна витрат припадає на утримання будівель, що використовують близько третини первинної енергії (рис. 2) [3,4]. Тому їм приділяється значна увага з боку міжнародної спільноти. В результаті сфера будівництва, житлова політика і політика житлово-комунального господарства в Україні протягом останніх 5 років зазнала значних комплексних реформ. Було розроблено набір документів (методичні матеріали, рекомендації, методології та стандарти), що регулюють галузь і визначають пріоритетний напрямок державної політики в питаннях підвищення рівня енергоефективності будівель.

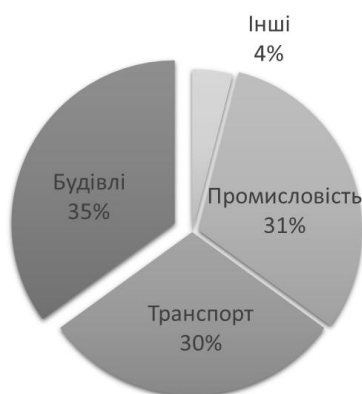


Рис. 2 – Використання первинної енергії за сегментами

Підтвердженням актуальності питання є прийняття Закону України «Про енергетичну ефективність будівель», що почав діяти з 23 липня 2018 року [5], що впроваджує з 1 липня 2019 року обов'язкову процедуру енергетичної сертифікації та визначення класів енергоефективності для вказаного переліку будівель [5,6]. Енергетична ефективність будівель може забезпечуватися шляхом [5]:

- 1) підвищення теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій будівель;
- 2) встановлення засобів обліку та регулювання споживання енергетичних ресурсів;
- 3) впровадження автоматизованих систем моніторингу і управління інженерними системами;
- 4) підвищення енергетичної ефективності інженерних систем будівлі;
- 5) використання відновлюваних та альтернативних джерел енергії;
- 6) застосування систем акумуляційного електронагріву в години мінімального навантаження електричної мережі та інших заходів із забезпечення енергетичної ефективності будівель.

В оцінці енергетичної ефективності будівель, розглядають показники енергопотребності на опалення, охолодження, гарячого водопостачання, систем вентиляції та освітлення, загальний рівень споживання первинної енергії та аналіз пов'язаних з цим викидів парникових газів [5].

Будівля – складний технологічний об'єкт, проектування, спорудження, оснащення, введення в експлуатацію та обслуговування якого потребує значного діапазону спеціалістів: від будівельників, архітекторів, дизайнерів до сантехників, електриків та професіоналів інших галузей знань. Кожен з них має значний вплив на якість кінцевого результату. Для створення високоєфективної системи, її складові частини мають злагоджено співпрацювати і відповідати за рівнем одна одній. Прикладом найвищого рівня оптимізації конструкції та обладнання з метою досягнення найвищого рівня енергоефективності можуть бути пасивні (passive house), автономні (autonomous building)



та будинки нульовим енергоспоживанням (zero energy building). Кожен з цих видів будівель має власні критерії приналежності та сертифікації.

Пасивні будівлі використовують до 15 кВт·год/(м<sup>2</sup>) енергії на власне опалення та, аналогічно, охолодження на рік [7,8] що становить близько 10 % від енергоспоживання звичайних будівель. Такий результат досягається за рахунок використання високоефективних теплоізоляційних матеріалів та підвищеної теплової ємності стін, які акумулюють енергію, врахування сонячної радіації та ефективної системи рекуперації тепла. Автономні будівлі повністю ізольовані від зовнішніх енерго-, тепло-, водопостачання та інших послуг. А під нульовим енергоспоживанням розуміється те, що загальна кількість енергії, яка використовується протягом року будівлею, рівна об'єму генерованій будинком відновлюваній енергії, яка повертається в мережу. При цьому в будинках підтримуються внутрішні оптимальні комфортні умови для користувачів, використовуючи автоматичне управління параметрами [9].

Незважаючи на значення таких будівель для навколишнього середовища та навантаження на енергосистему, головним недоліком є їхня вартість та довгий термін окупності інвестицій, близько 18 років [9], що приводить до важливих питань в даній темі щодо оптимального рівня енергоефективності та мотивації використання енергозберігаючих технологій.

В Україні розроблена методика для розрахунку економічно доцільного рівня енергетичної ефективності будівель, що враховує вимоги актів законодавства Європейського Союзу, Енергетичного Співтовариства та гармонізованих європейських стандартів [5,7]. Необхідний рівень встановлюється за результатами аналізу витрат і вигод, де враховується:

- розрахунковий строк служби будівлі або її елемента;
- витрати на енергоносії, продукцію, системи;
- витрати на технічне обслуговування, експлуатацію і оплату праці персоналу;
- динаміка цін на енергоносії для планування витрат на паливо, що використовується для енергопостачання в будівлі та ставка дисконтування.

Також, приймаючи рішення, можна враховувати кліматичні особливості, доступ до природних ресурсів, тип та режим використання, досвід від впровадження подібних проектів в регіоні та інші фізичні, соціальні і політичні параметри, що вводять корективи до фактичної результуючої ефективності комплексу заходів.

Окрім економічних переваг, критеріями впровадження енергоефективних рішень та систем автоматизації можуть бути престижність, зручність, можливість віддаленого управління і контролю або екологічна «свідомість». Завдяки інформації про клас енергоефективності будівель визначається реальна вартість нерухомості. Чим вище клас, тим дорожче нерухомість.

З іншого боку, для досягнення найвищого результату необхідно забезпечити рівномірний вплив на параметри будівлі та її інженерні системи. Тобто розробка окремого сегменту енергозберігаючих рішень може не дати очікуваного результату в порівнянні з більш комплексними підходами при однакових інвестиційних затратах. Тому існує потреба в оцінці властивостей, функцій та можливостей всіх структур будівлі, для визначення їх впливу на параметри енергоефективності та вибору оптимального набору характеристик.

### **Мета і завдання дослідження**

Метою даної роботи є визначення впливу системи автоматизації на загальне значення енергоефективності будівлі в залежності від комплексу функцій, які вона виконує, що дозволяє визначити оптимальну структуру і функції системи автоматизації для скорочення необхідних витрат або більш раціональному використанні матеріальних ресурсів.

### **Результати досліджень та їх обговорення**

Рішення в галузі автоматизації, підвищують ефективність функцій управління опаленням, вентиляцією, охолодженням, гарячим водопостачанням, освітленням, живленням побутових пристроїв тощо.

Використання систем автоматизації в будівлях регламентується європейським стандартом EN15232 [11]. Даний стандарт був адаптований в Україні і використовується як національний стандарт ДСТУ Б EN 15232:2011. Він описує функції контролю і керування як систем будівлі, так і процесів та обслуговування, що пов'язані з експлуатацією та управлінням будівлею та її технічними системами. Стандарт EN15232 задає методику оцінки впливу функцій систем автоматизації та засобів технічного управління будівлі на енергоефективність, а також методику визначення мінімальних вимог до таких систем для будівель різної складності.

Основна мета використання автоматизованих систем моніторингу та управління будівлями (АСМУБ) - підвищення функціональної та енергетичної ефективності експлуатації будівель за рахунок ефективного управління технічними системами будівлі (рис 3). Комплексні та інтегровані функції енергозбереження та відповідні режими експлуатації можуть бути сконфігуровані для фактичного використання будівель залежно від реальних потреб споживача для уникнення зайвого використання енергії та виділення CO<sub>2</sub>.



**Рис. 3 – Технічні системи та функції будівлі, що знаходяться під контролем АСМУБ та ТУБ**

Функції технічного управління будівлею (ТУБ) надають інформацію стосовно експлуатації, технічного обслуговування та управління будівлями для контролю енергоспоживання: вимірювання, документування результатів, подання аварійних сповіщень та виявлення надлишкового використання енергії.

Відповідно до стандарту системи автоматизації будівлі розділяються на чотири класи в залежності від використаних засобів та алгоритмів керування (рис. 4). Вони відрізняються від загальної класифікації будівель за енергетичною ефективністю, що позначаються сімома літерами від А до G [10].



**Рис. 4 – Класи енергоефективності АСМУБ і ТУБ**

Принцип побудови таких систем в розрізі автоматизації виглядає як нарощення функціональності з підвищенням класу енергоефективності системи управління, що вказує на рівень впливу автоматизації і технічного управління будівлею на енергоспоживання будівлі [10].

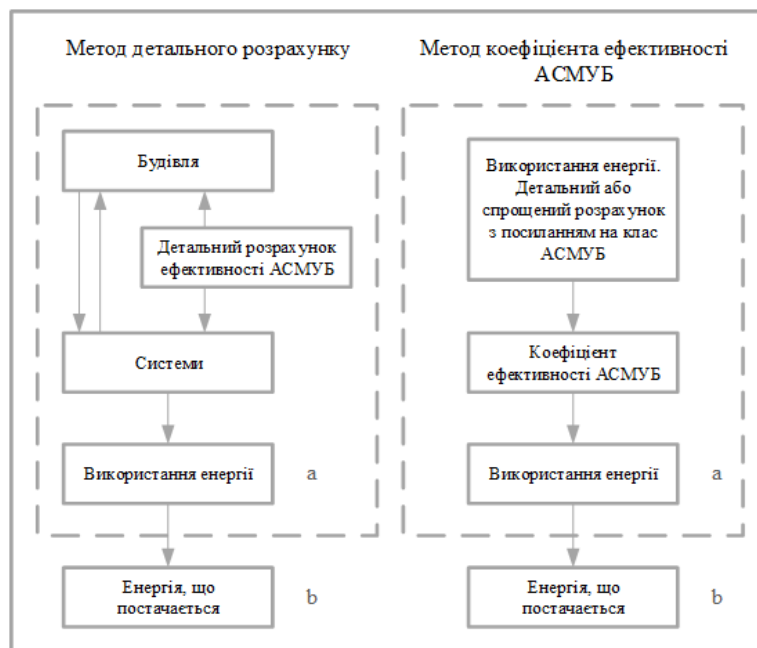
Наприклад, клас С – базовий. До нього належать будівлі в яких використовується автоматика тільки центральних систем (опалення, вентиляція і кондиціонування). В свою чергу при побудові будівлі класу А необхідно використання засобів автоматизації на всіх рівнях, їх повна інтеграція між собою, створення систем технічного управління будівлею, моніторингу, проведення аналізу даних та оптимізація витрат енергії. Основні характеристики та вимоги до класів представлені в таблиці 1.

Розрахунок впливу функцій автоматизації, моніторингу та управління будівлями на енергоефективність будівлі можна провести або методом детального розрахунку, або із застосуванням коефіцієнта ефективності АСМУБ. Порівняння цих методів та послідовність їх розрахунку приведені на рисунку 5 [11].

Метод детального розрахунку доцільний за наявності достатньої інформації стосовно функцій автоматизації, моніторингу та управління, що використовуються для будівель та енергетичних систем. Застосування процедури детального розрахунку передбачає, що всі функції автоматизації, моніторингу та управління, що мають бути враховані при експлуатації будівлі та її енергетичних систем, відомі.

**Таблиця 1** – Характеристика класів енергоефективності

Клас	Енергоефективність
А	Відповідає високому рівню енергетичних характеристик АСМУБ та ТУБ
	- Інтегроване місцеве управління та моніторинг з урахуванням фактичних потреб в енергії - Планове обслуговування - Енергетичний моніторинг - Неперервна оптимізація витрати енергії
В	Відповідає просунутим АСМУБ та деяким специфічним функціям ТУБ
	- Мережева автоматизація приміщення без урахування фактичних потреб - Енергетичний моніторинг
С	Відповідає стандартній АСМУБ
	- Мережева автоматизація центральних систем будівель - Відсутність електронної автоматизації приміщення - В приміщеннях відсутні електронні контролери чи термостатичні головки на радіаторах опалення - Без моніторингу енергії
D	Відповідає неенергоефективному АСМУБ. Будинки з такими системами буде модернізовано. Новобудови не повинні бути обладнані такими системами
	- Без мережевих функцій автоматизації будівель - Відсутні контролери в приміщеннях - Без моніторингу енергії



*a* - Витрата енергії на опалення, охолодження, вентиляцію, гаряче водопостачання або освітлення  
*b* - Передана енергія - загальна енергія з поділом на енергоносії (газ, нафта, електроенергія тощо)

**Рис. 5** – Відмінності між методом детального розрахунку та методом із використанням коефіцієнта ефективності АСМУБ

Другий метод надає приблизну оцінку впливу впровадження автоматизації залежно від класів ефективності. Розрахувати потребу енергії для кожної з систем будівлі можна за формулою (1). В таблиці 2 зазначені коефіцієнти ефективності для теплової та електричної енергії, що класифіковані залежно від типу будівлі та класу до якого відноситься система.

$$Q_t = Q_{ref} \times \frac{k_e}{k_{ref}} \quad (1)$$

де  $Q_t$  – повний обсяг енергії, необхідної для утримання будівлі;

$Q_{ref}$  – енергопотреба для базового класу (зазвичай використовується клас С);

$k_e$  – коефіцієнт ефективності;

$k_{ref}$  – коефіцієнт ефективності базового класу.

**Таблиця 2 – Коефіцієнти енергоефективності будівлі**

Тип будівлі	Коефіцієнти ефективності теплової/електрично енергії							
	D		C		B		A	
	Неенергоефективний		Стандартний		Просунутий		Високоєфективний	
Житлові будинки	1,10	1,08	1	1	0,88	0,93	0,81	0,92
Офіси	1,51	1,1	1	1	0,80	0,93	0,70	0,87
Лікарні	1,31	1,05	1	1	0,91	0,98	0,86	0,96
Ресторани	1,23	1,04	1	1	0,73	0,96	0,6	0,92

Для прикладу, за даними з таблиці 2, економія енергії для офісної будівлі класу А в порівнянні з базовим класом С для теплової енергії складатиме 30%, а для електроенергії – 13%. Порівнюючи дану систему з іншими класами енергоефективності (таблиця 3), можна відстежити за рахунок яких функцій ми отримуємо такий економічний ефект.

**Таблиця 3 – Порівняльна характеристика класів енергоефективності АСМУБ**

Характеристика	Клас			
	A	B	C	D
Автоматизація центральних систем будівлі	✓	✓	✓	✗
Зв'язок кімнатних систем керувань з центральними	✓	✓	✗	✗
Енергетичний моніторинг	✓	✓	✗	✗
Точне підтримання клімату в приміщеннях	✓	✓	✗	✗
Автоматичне управління освітленням та жалюзі	✓	✓	✗	✗
Врахування фактичних потреб в енергії при управлінні	✓	✗	✗	✗
Звітність та оптимізація витрати енергії	✓	✗	✗	✗
Планування обслуговування системи	✓	✗	✗	✗

Таким чином при успішному виконанні всіх зазначених в стандарті вимог, досягається максимальна енергоефективність без негативного впливу на комфорт користувачів. Стандарт EN 15232 вперше чітко показує величезний потенціал економії енергії, укладений в інженерних системах будівель, чітко визначає методи розрахунку та вимоги до систем автоматизації. В той же час він не вказує способи реалізації функцій систем, що дає спеціалісту свободу дій та можливість застосовувати найновіші технології для успішного виконання проекту.

За рахунок комплексних рішень, інтегрованих функцій енергозбереження та організованих відповідних режимів експлуатації, системи автоматизації сучасних будівель можуть бути сконфігуровані для фактичного використання енергоресурсів залежно від реальних потреб споживача для уникнення зайвого використання енергії та зниження експлуатаційних затрат власників.

Для досягнення бажаних економічних ефектів, система автоматизації повинна відповідати технічним характеристикам будівлі, що означає як і неможливість отримання високих результатів за допомогою комплексу АСМУБ в будинку з низьким класом енергоефективності, так і недосяжність високого класу без автоматизації. З цього випливає зв'язок всіх характеристик будівлі в один міжгалузевий комплекс, де враховуються, окрім зазначених вище, і соціальні, екологічні, естетичні фактори та критерії. Це призводить до унікальної ситуації, коли технічне обладнання обирається за зовнішнім виглядом та відповідності інтер'єру та навпаки основні інтер'єрні комбінації обумовленні конструкційними рішеннями та встановленим обладнанням, або коли перевага надається екологічним системам чи матеріалам за рахунок збільшення вартості об'єкта.

Проте крім впливу фізичних параметрів, не останнє значення має поведінка користувачів [12], що здатна спотворювати результати. Відповідно, вона є ключовим фактором для розуміння величезних розривів між реальними та прогнозованими енергетичними показниками будівель [13]. Мотивація впровадження та використання енергоефективних рішень в галузі є завданням соціальної політики держави та громадянського суспільства, спрямованого на забезпечення сталого розвитку держави [5]. Необхідна організація соціальних та економічних заходів, спрямованих на залучення та інформування кінцевих користувачів про енергоспоживання та його вплив на навколишнє середовище [14], що включає як і вже впровадженні в Україні (енергетичне маркування, сертифікація, енергоаудит, розробка нормативної бази, системи зобов'язань, економічних стимулів та перешкод) так і перспективні напрямки роботи (освітні заходи, система заохочення, зворотного зв'язку, ініціативи на базі громади, постановка цілей та гейміфікація).

### Висновок

Розвиток енергоефективного підходу до проектування, спорудження та управління будівлею включає в себе міжгалузевий комплекс напрацювань, що безпосередньо пов'язує між собою соціальні, економічні, технічні,



екологічні, естетичні фактори та критерії. Це вказує на складність таких об'єктів і необхідність злагодженої роботи спеціалістів різних професій для забезпечення рівномірного впливу на параметри будівлі та її інженерні системи. Для структурування вимог, процедур, норм для будинків, розроблено набір нормативних документів та нормативно-правових актів як на рівні держав, наприклад в Україні, так і на рівні міжнародних ініціатив.

Впровадження АСМУБ необхідне і обов'язкове для створення високоенергоєфективної будівлі. Можливо провести приблизну первинну оцінку їх впливу на загальний рівень енерговитрат та енергопотребі використовуючи відповідні коефіцієнти класів енергоєфективності системи автоматизації в відповідності до функцій, які вони виконують. Системи вищого рівня складніші, вимагають інтеграції різномірних функцій та організацію відповідних режимів експлуатації встановленого обладнання, що конфігурується для уникнення надлишкових витрат ресурсів під час експлуатації будівлі. Але це значно підвищує розмір необхідних інвестицій для проектування, розробки та впровадження АСМУБ.

Проте застосування енергоєфективних технологій має свою межу доцільності, обґрунтовану економічними чи іншими критеріями. Це ставить перед суспільством, інженерами та науковцями завдання розвитку не тільки в напрямку підвищення ефективності, а і здешевлення технологій, обладнання і матеріалів для їх широкого застосування.

**Подяка.** Стаття підготовлена в рамках виконання проекту «Розроблення техніко-технологічних схем та систем керування теплозабезпечення населених пунктів на основі термодинамічних підходів» (номер державної реєстрації НДР 0120U102168).

### Список використаних джерел

- [1] Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. URL: <https://www.nerc.gov.ua> (дата звернення: 20.02.2020).
- [2] The 2018 International Energy Efficiency Scorecard. *American Council for an Energy-Efficient Economy*. URL: <https://aceee.org/research-report/i1801> (дата звернення: 20.02.2020).
- [3] Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050, Paris: International Energy Agency, 2013. - 290 p.
- [4] 2019 Global Status Report for Buildings and Construction. *Global Alliance for Buildings and Constructions*. URL: <https://globalabc.org/resources/publications/2019-global-status-report-buildings-and-construction> (дата звернення 20.02.2020).
- [5] Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 № 2118-VIII. Київ: Відомості Верховної Ради (ВВР), 2017, № 33, ст.359.
- [6] Про затвердження переліку будівель промислового та сільськогосподарського призначення, об'єктів енергетики, транспорту, зв'язку та оборони, складських приміщень, на які не поширюються мінімальні вимоги до енергетичної ефективності будівель та які не підлягають сертифікації енергетичної ефективності будівель: Постанова Кабінету Міністрів України від 11.04.2018 № 265-2018-п. *Законодавство України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/265-2018-%D0%BF> (дата звернення 20.02.2020).
- [7] Mihai, M., Tanasiev, V., Dinca, C., Badea, A., & Vidu, R. Passive house analysis in terms of energy performance. *Energy and Buildings*. 2017. № 144. С. 74 – 86.
- [8] Passive House Institute, Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard. *Passivhaus Institut*: веб-сайт. URL: [https://passiv.de/downloads/03\\_building\\_criteria\\_en.pdf](https://passiv.de/downloads/03_building_criteria_en.pdf) (дата звернення: 20.02.2020).
- [9] Carutasiu, M.-B., Tanasiev, V., Ionescu, C., Danu, A., Necula, H., & Badea, A. Reducing energy consumption in low energy buildings through implementation of a policy system used in automated heating systems. *Energy and Buildings*. 2015. № 94. С. 227 – 239.
- [10] Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 № z0822-18. *Законодавство України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0822-18> (дата звернення 20.02.2020).
- [11] ДСТУ Б EN 15232:2011. Енергоєфективність будівель. Вплив автоматизації, моніторингу та управління будівлями (EN 15232:2007, IDT). Київ: Мінрегіон України, 2012. 115 с.
- [12] Chen, S., Zhang, G., Xia, X., Setunge, S., & Shi, L. A review of internal and external influencing factors on energy efficiency design of buildings. *Energy and Buildings*. 2020. № 216.
- [13] Fabi, V., Barthelmes, V. M., Schweiker, M., & Corgnati, S. P. Insights into the effects of occupant behaviour lifestyles and building automation on building energy use. *Energy Procedia*. 2017. № 140. С. 48 – 56.
- [14] Iweka, O., Liu, S., Shukla, A., & Yan, D. Energy and behaviour at home: A review of intervention methods and practices. *Energy Research & Social Science*. 2019. № 57.

### References

- [1] National Commission for state regulation in the energy and utilities. [Online]. Available: <https://www.nerc.gov.ua> (Accessed: Feb. 20, 2020).
- [2] The 2018 International Energy Efficiency Scorecard. *American Council for an Energy-Efficient Economy*. [Online]. Available: <https://aceee.org/research-report/i1801> (Accessed: Feb. 20, 2020).



- [3] Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050, Paris: International Energy Agency, 2013. - 290 p.
- [4] 2019 Global Status Report for Buildings and Construction. *Global Alliance for Buildings and Construction*. [Online]. Available: <https://globalabc.org/resources/publications/2019-global-status-report-buildings-and-construction> (Accessed: Feb. 20, 2020).
- [5] Pro enerhetychnu efektyvnist budivel: Zakon Ukrainy vid 22.06.2017 № 2118-VIII. *Zakonodavstvo Ukrainy*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19> (Accessed: Feb. 20, 2020).
- [6] Pro zatverdzhennia pereliku budivel promyslovoho ta silskohospodarskoho pryznachennia, ob'ektiv enerhetyky, transportu, zviazku ta oborony, skladskykh prymishchen, na yaki ne poshyriuiutsia minimalni vymohy do enerhetychnoi efektyvnosti budivel ta yaki ne pidliahaiut sertyfikatsii enerhetychnoi efektyvnosti budivel: Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 11.04.2018 № 265-2018-p. *Zakonodavstvo Ukrainy*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/265-2018-%D0%BF> (Accessed: Feb. 20, 2020).
- [7] Mihai, M., Tanasiev, V., Dinca, C., Badea, A., and Vidu, R. "Passive house analysis in terms of energy performance," *Energy and Buildings*, vol. 144, pp. 74 – 86, June 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.03.025.
- [8] Passive House Institute, Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard. *Passivhaus Institut*. [Online]. Available: [https://passiv.de/downloads/03\\_building\\_criteria\\_en.pdf](https://passiv.de/downloads/03_building_criteria_en.pdf) (Accessed: Feb. 20, 2020).
- [9] Carutasiu, M.-B., Tanasiev, V., Ionescu, C., Danu, A., Necula, H., & Badea, A. "Reducing energy consumption in low energy buildings through implementation of a policy system used in automated heating systems," *Energy and Buildings*, vol. 94, pp. 227 – 239, May 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.03.008.
- [10] Pro zatverdzhennia Metodyky vyznachennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel: Nakaz Ministerstva rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrayiny vid 11.07.2018 № z0822-18. *Zakonodavstvo Ukrainy*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0822-18> (Accessed: Feb. 20, 2020).
- [11] DSTU B EN 15232:2011. Enerhoefektyvnist budivel. Vplyv avtomatyzatsii, monitorynhu ta upravlinnia budivliamy (EN 15232:2007, IDT). Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2012.
- [12] Chen, S., Zhang, G., Xia, X., Setunge, S., & Shi, L. "A review of internal and external influencing factors on energy efficiency design of buildings," *Energy and Buildings*, vol. 216, June 2020, Art. no. 109944, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109944.
- [13] Fabi, V., Barthelmes, V. M., Schweiker, M., & Corgnati, S. P. "Insights into the effects of occupant behaviour lifestyles and building automation on building energy use," *Energy Procedia*, vol. 140, pp. 48 – 56, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.122.
- [14] Iweka, O., Liu, S., Shukla, A., & Yan, D. "Energy and behaviour at home: A review of intervention methods and practices," *Energy Research & Social Science*, vol. 57, Nov. 2019, Art. no. 101238, doi: 10.1016/j.erss.2019.101238.

УДК 621.577.4

## ЗАСТОСУВАННЯ КРИТЕРІВ ПОГЛИБЛЕНОГО ЕКСЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОБГРУНТУВАННЯ РІШЕНЬ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОАСОСНОЇ УСТАНОВКИ НА СТИЧНИХ ВОДАХ

Некрасевич О.В.<sup>1</sup>, Волощук В.А.<sup>2</sup>, Ковриго Ю.М.<sup>3</sup>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
м. Київ, Україна

ORCID: <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2263-3549>, <sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0687-8968>,

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2928-1905>

E-mail: <sup>1</sup> [olena.nekrashevych@gmail.com](mailto:olena.nekrashevych@gmail.com), <sup>2</sup> [vl.volodya@gmail.com](mailto:vl.volodya@gmail.com), <sup>3</sup> [yukovrygo@gmail.com](mailto:yukovrygo@gmail.com)

Copyright © 2020 by author and the journal "Automation of technological and business – processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i2.1805>



**Анотація.** В роботі на основі критеріїв поглибленого ексергетичного аналізу визначені місця, значення та причини термодинамічних втрат у теплонасосній установці на стічних водах у складі системи теплозабезпечення будинку. Визначено, що у компресорі 76 % деструкції ексергії, яку можна уникнути, залежить від термодинамічної досконалості інших елементів. Всі 100 % деструкції ексергії, що можна уникнути у дросельному вентилі, залежать від необоротностей в інших елементах. 90...97 % деструкції ексергії, яку можна уникнути у конденсаторі, випарнику та проміжному теплообміннику залежать від термодинамічної досконалості цих же елементів. Найбільше значення сезонної деструкції ексергії, що можна позбутися у теплонасосній установці за рахунок термодинамічного удосконалення  $k$ -го компонента, зосереджене у теплообміннику проміжного контуру і становить близько 40 %. Випарник та конденсатор мають менші можливості з точки зору зниження деструкції ексергії у теплонасосній установці (відповідно 29 та 24 %). У компресорі такі можливості незначні. Відповідно, з метою підвищення енергетичної ефективності такої установки, необхідно у першу чергу знижувати необоротності у проміжному теплообміннику шляхом зменшення у ньому температурного напору. Отримані висновки підтверджуються шляхом розрахунку сезонного споживання електроенергії для заданого сезонного виробництва теплової енергії у різних варіантах удосконалення теплонасосної установки. Показано, що саме удосконалення проміжного теплообмінника забезпечує найбільше (до 12%) зниження сезонного споживання електроенергії.

**Abstract.** On the base of criteria of advanced exergetic analysis location, magnitude and causes of thermodynamic inefficiencies are identified within a wastewater source heat pump system providing space heating. It is shown that for the investigated conditions, the biggest part (76 %) of exergy destruction in the compressor and all exergy destructions in throttling valve can be avoided by reducing irreversibilities in the remaining components of the system. 90...97 % of exergy destructions, which can be avoided in the condenser, evaporator and the wastewater heat exchanger, are mainly caused by irreversibilities within these components. The biggest part (40 %) of avoidable exergy destruction in the heat pump is due to thermodynamic inefficiencies (caused by temperature difference) in the wastewater heat exchanger. The condenser and the evaporator have fewer possibilities (respectively 29 and 24 %) for improving exergy efficiency of the system. The compressor has the last and minor priority for decreasing irreversibilities. According to the data obtained, in order to improve the energy efficiency of such system irreversibility within wastewater heat exchanger should be of the highest priority to decrease. For this case the temperature difference within this component should be decrease. The obtained conclusions are confirmed by calculating seasonal electricity consumption of different cases of the heat pump improvement. It is shown that enhancement wastewater heat exchanger provides the highest (up to 12%) reduction of seasonal electricity consumption.

**Ключові слова:** ключові показники енергетичної ефективності, поглиблений ексергетичний аналіз, деструкція ексергії, теплонасосна установка на стічних водах, теплозабезпечення будинку

**Keywords:** Key energy efficiency indicators, advanced exergetic analysis, exergy destruction, wastewater source heat pump, space heating

## Вступ

Теплонасосні установки (ТНУ) є одними із найбільш перспективних технологій в теперішній час для цілого ряду сфер. Особливе місце належить теплонасосним системам, що використовують низькопотенційну енергію стічних вод. Завдяки відносно вищим температурам низькопотенційного джерела такі системи характеризуються вищою енергетичною ефективністю. З іншої сторони дані ТНУ є технологічно складнішими і дорожчими.

В існуючій науковій та особливо інженерній практиці для оцінювання енергетичної ефективності ТНУ використовують так званий коефіцієнт трансформації:

$$COP_{HP} = \frac{\dot{Q}_{HP}}{\dot{N}_{HP}}, \quad (1)$$

де  $\dot{Q}_{HP}$  - теплова потужність ТНУ, Вт;

$\dot{N}_{HP}$  - електрична потужність, яка споживається для приводу ТНУ, Вт;

Разом з тим такий параметр характеризується певними недоліками [0]. По-перше, він інтегрально оцінює енергетичну ефективність установки. На основі даного критерію важко зрозуміти який елемент з його параметрами і на скільки впливають на споживання електричної енергії для заданої теплової потужності. По-друге, можна навести приклади, де застосування даного критерію призводить до помилкових висновків.

Коефіцієнт трансформації створений на основі суто енергетичного або ентальпійного балансу.

При обґрунтуванні параметрів та режимів роботи теплоенергетичних систем методи ексергетичного аналізу, що базуються на поєднанні Першого та Другого законів термодинаміки, характеризуються ширшими можливостями у порівнянні із методами енергетичного або ентальпійного аналізу, які в своїй основі використовують тільки Перший закон термодинаміки.



На відміну від енергетичного аналізу ексергетичний метод оцінювання пропонує критерії, які дають можливість визначити місцезнаходження, значення та джерела термодинамічних втрат в системі.

Новим етапом методології ексергетичного оцінювання є поглиблений ексергетичний аналіз, який розроблений представниками німецької школи прикладної термодинаміки [0 - 0]. Даний аналіз важливий з точки зору розширення можливостей ексергетичного підходу для прикладного використання.

Огляд літературних джерел показав, що методологія поглибленого ексергетичного аналізу реалізована, в основному, на прикладі холодильних машин або ТНУ промислового призначення, де розглядається тільки один режим роботи – номінальний [0- 0]. На основі детального аналізу існуючих робіт автори [0] приходять до висновку, що зовсім мало досліджень з ексергетичного оцінювання присвячено ТНУ на стічних водах. В роботі [0] наведені дані із поглибленого ексергетичного аналізу ТНУ на стічних водах в складі системи теплозабезпечення будинку, але без урахування її термодинамічної взаємодії із теплообмінником, що призначений для передачі енергії стічних вод теплоносію проміжного контуру. Крім того, у випадку роботи ТНУ у складі системи теплозабезпечення будинку має місце мінливість його режимів роботи, що визначається впливом погодно-кліматичного чинника як всередині опалювального сезону, так і у багаторічному перерізі.

### Мета роботи

Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності ТНУ на стічних водах у складі системи теплозабезпечення будинку на основі застосування критеріїв поглибленого ексергетичного аналізу як ключових показників енергетичної ефективності.

### Викладення основного матеріалу

В кожному елементі енергоперетворювальної системи можна позбутися тільки частини термодинамічних втрат. Через технологічні обмеження, які пов'язані, наприклад, із існуючими матеріалами, технологіями і/або вартістю матеріалів і виробничих процесів, максимальне значення ексергетичної ефективності k-го компонента не може бути збільшено при будь-яких інвестиціях. Частина деструкції ексергії, яка незалежно від досконалості компонента буде мати місце, називається неминучою, або та, якої позбутися неможна (англ. – unavoidable - UN). Інша частина деструкції ексергії - та, якої можна позбутися (англ. – avoidable - AV) [0 – 0]:

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,k}^{AV} + \dot{E}_{D,k}^{UN} \quad (2)$$

Отже, при удосконаленні енергосистеми, зусилля повинні бути направлені саме на ту частину деструкції ексергії, якої можна позбутися.

Доведено, що деструкція ексергії в окремому елементі системи залежить від необоротностей як безпосередньо у самому елементі так і в інших елементів, що входять у систему [0 – 0]. В результаті була розроблена теорія розділення деструкції ексергії на внутрішню залежну (англ. – endogenous - EN) та зовнішню залежну (англ. – exodogenous - EX) [0 – 0]:

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,k}^{EN} + \dot{E}_{D,k}^{EX} \quad (3)$$

На основі отриманих значень внутрішню та зовнішню залежних частин деструкції ексергії можна розробити стратегію удосконалення системи [0 – 0]:

- при  $\dot{E}_{D,k}^{EN} > \dot{E}_{D,k}^{EX}$ , необхідно зробити акцент на удосконалення даного компонента;
- при  $\dot{E}_{D,k}^{EN} < \dot{E}_{D,k}^{EX}$ , даний компонент може бути удосконалений «автоматично» за рахунок удосконалення інших компонентів системи або структурних змін системи.
- при  $\dot{E}_{D,k}^{EN} = \dot{E}_{D,k}^{EX}$  варто перейти до аналізу інших елементів системи, оскільки удосконалення одного з інших елементів обов'язково вплине на значення деструкції ексергії в даному елементі, тобто призведе до перших двох випадків аналізу.

В результаті такого поділу деструкції ексергії з'явився так званий поглиблений ексергетичний аналіз [0 – 0]. Об'єднання цих чотирьох складових деструкції ексергії елемента системи забезпечило її поділ на такі частини:

внутрішню залежну і ту, якої неможна позбутися  $\dot{E}_{D,k}^{UN,EN}$  - не може бути усунута через існуючі технологічні

обмеження даного елемента системи; зовнішню залежну і ту, якої неможна позбутися  $\dot{E}_{D,k}^{UN,EX}$  - не може бути усунута через існуючі технологічні обмеження інших елементів системи та даного структурного рішення; внутрішню

залежну і ту, якої можна позбутися  $\dot{E}_{D,k}^{AV,EN}$  - може бути усунута за рахунок удосконалення даного елемента

системи; зовнішню залежну і ту, якої можна позбутися  $\dot{E}_{D,k}^{AV,EX}$  - може бути усунута за рахунок удосконалення інших елементів системи та/або структурного рішення системи.



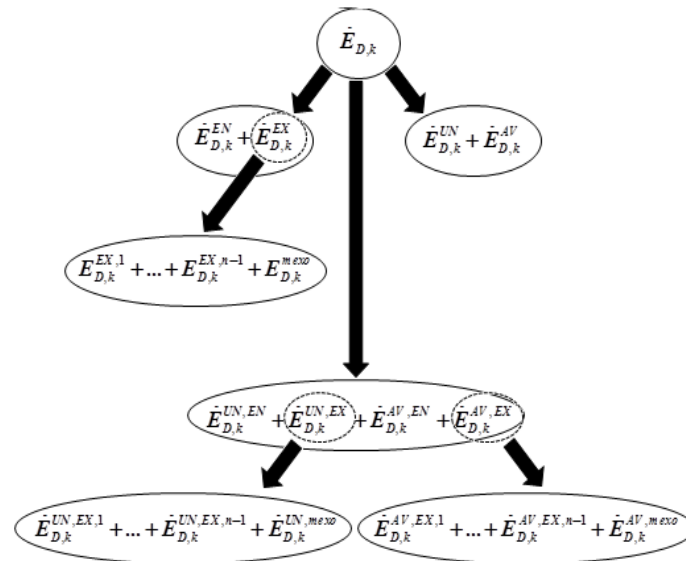
Крім того, для кращого розуміння взаємного впливу компонентів системи, зовнішню залежну деструкцію ексергії k-го компонента можна розділити за формулою [0]:

$$\dot{E}_{D,k}^{EX} = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq k}}^{n-1} \dot{E}_{D,k}^{EX,r} + \dot{E}_{D,k}^{mexo}, \quad (4)$$

де  $\dot{E}_{D,k}^{EX,r}$  - частина зовнішньої залежної деструкції ексергії в k-му компоненті, яка спричинена r-м компонентом;

$\dot{E}_{D,k}^{mexo}$  - частина зовнішньої залежної деструкції ексергії в k-му компоненті, яка спричинена одночасною дією всіх компонентів системи одночасно.

На рис. 1 показана структура розділення деструкції ексергії у k-му компоненті системи у відповідності до наведеної вище класифікації.



**Рис. 1 – Поділ деструкції ексергії у k-му компоненті системи [0]**  
**Fig. 1 – Splitting exergy destruction within the k-th component of the system [0]**

З точки зору практичного удосконалення теплоенергетичної системи необхідно виділяти саме ту деструкцію ексергії, яку можна уникнути за рахунок удосконалення k-го елемента. Ця складова буде визначатися за формулою [0]:

$$E_{D,k}^{AV,\Sigma} = E_{D,k}^{AV,EN} + \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq k}}^{n-1} \dot{E}_{D,r}^{AV,EX,k}, \quad (5)$$

де  $E_{D,k}^{AV,\Sigma}$  - сумарне значення деструкції ексергії, якої можна позбутися за рахунок термодинамічного удосконалення

k-го компонента і яка має місце у даному елементі  $E_{D,k}^{AV,EN}$  та інших  $r$  - елементах  $\sum_{\substack{r=1 \\ r \neq k}}^{n-1} \dot{E}_{D,r}^{AV,EX,k}$ .

В даних дослідженнях в якості низькотемпературного джерела енергії використовуються стічні води з температурою, що змінюється в діапазоні 13...17 оС. Для проектного режиму охолодження теплоносія проміжного контуру у випарнику прийнято рівним 3 К, у теплообміннику проміжного контуру нагрів цього теплоносія становить 3 К. Мінімальний температурний напір як у випарнику так і у конденсаторі рівний 5 К. Температурний напір у теплообміннику проміжного контуру у проектному режимі становить 7 К.

Для дослідження режимів роботи системи теплозабезпечення при зміні теплового навантаження (непроектний режим роботи) використаний квазістаціонарний підхід побудови математичних моделей відповідно до [0] з урахуванням добового коливання параметрів впливу. Для кожного режиму роботи ТНУ ексергія продукту, яка рівна ексергії продукту конденсатора, залишається постійною.

Для реалізації поглибленого ексергетичного аналізу ТНУ використаний так званий термодинамічний метод, який базується на побудові гібридних термодинамічних циклів [0 – 0]. При цьому, для проектного режиму, при визначенні



деструкції ексергії, яку неможливо позбутися через технологічні обмеження, прийнятий мінімальний температурний напір у випарнику та конденсаторі рівним 1 К, у проміжному теплообміннику 2 К, а ізоентропний ККД компресора - 94%.

На даному етапі досліджень вплив гідравлічних опорів в елементах ТНУ на деструкцію ексергії окремо не вивчався.

Аналіз отриманих даних показав, що частка деструкції ексергії в кожному елементі ТНУ є різною в різні періоди опалювального сезону. Відповідно, на відміну від апробованих на практиці підходів з ексергетичної оцінки ТНУ, де розглядається тільки один режим роботи системи, для адекватної оцінки ТНУ в складі системи теплозабезпечення будинку з урахуванням мінливих режимів роботи пропонується використовувати динамічний метод аналізу на основі квазістаціонарного підходу з розрахунковим часовим кроком 24 год із подальшим інтегральним оцінюванням ексергетичних критеріїв за допомогою їх сезонних значень.

На рис. 2 показані сезонні значення внутрішньо залежної і тієї, що можна уникнути, деструкції ексергії  $E_{D,k}^{EN,AV,year}$  та зовнішньо залежної і тієї, що можна уникнути, деструкції ексергії  $E_{D,k}^{EX,AV,r,year}$  для кожного компонента ТНУ. Причому остання складова у свою чергу розподілена кількісно на ті інші елементи теплового насоса, від яких вона залежить (див. формулу (4)).

Отже, із рис. 2 бачимо, що в компресорі більша половина деструкції ексергії, яку можна уникнути, (496 кВт-год або 76 %) залежить від термодинамічної досконалості інших елементів. У свою чергу, ця деструкція, в основному обумовлена недосконалістю проміжного теплообмінника та випарника, через що у компресорі має місце 194 кВт-год та 135 кВт-год сезонної деструкції ексергії відповідно. Всього 69 кВт-год сезонної деструкції ексергії у компресорі спричинена конденсатором, а 98 кВт-год – сумісною дією кількох елементів (проміжного теплообмінника, випарника та конденсатора).

Із рис. 2 бачимо, що на відміну від компресора, в конденсаторі майже вся деструкція ексергії, яку можна уникнути, (229 кВт-год або 96 %) залежить від термодинамічної досконалості самого конденсатора.

Із рис. 2 видно, що у дросельному вентилі вся частина деструкції ексергії, яку можна уникнути, залежить від термодинамічної досконалості інших компонентів ТНУ. Причому, більша частка (162 кВт-год або 35 %) даної деструкції спричинена недосконалістю проміжного теплообмінника. 138 кВт-год або 30 % даної частини деструкції ексергії зумовлена процесами необоротності при передачі теплоти у конденсаторі. 125 кВт-год або 27 % даної частини деструкції ексергії зумовлена процесами необоротності при передачі теплоти у випарнику. Як видно із рис. 2 частина зовнішньо залежної і тієї, яку можна уникнути, деструкції ексергії у дросельному вентилі, що зумовлена компресором, є від'ємною (-5 кВт-год). Це означає, що ця частина деструкції ексергії у дросельному вентилі може бути зменшена шляхом збільшення термодинамічної досконалості у компресорі. Деструкція ексергії, що можна уникнути, і яка обумовлена сумісною дією всіх чотирьох елементів (проміжного теплообмінника, випарника, конденсатора та компресора) рівна 40 кВт-год.

Із рис. 2 видно, що у випарнику майже вся частина деструкції ексергії (277 кВт-год або 90 %), яку можна уникнути, залежить від термодинамічної досконалості самого випарника. Що ж стосується зовнішньо залежної деструкції ексергії, то найбільша частка, 37 кВт-год, але з від'ємним знаком, обумовлена сумісними процесами необоротності у компресорі, конденсаторі та проміжному теплообміннику. Для зменшення від'ємної частини деструкції ексергії у випарнику необхідно на цю величину збільшити деструкцію ексергії в інших елементах.

Так само як і у конденсаторі та випарнику майже вся частина деструкції ексергії (277 кВт-год або 89 %), яку можна уникнути, залежить від термодинамічної досконалості самого проміжного теплообмінника.

Отже, як видно із рис. 2, найбільше значення сумарної деструкції ексергії, що можна позбутися у ТНУ за рахунок термодинамічного удосконалення k-го компонента, зосереджене у теплообміннику проміжного контуру і рівне

$E_{D,SWHE}^{AV,\Sigma,year} = 726$  кВт-год (або близько 40 %). Для випарника та конденсатора ці частини деструкції ексергії виявилися меншими ніж у теплообміннику проміжного контуру і рівні відповідно 531 кВт-год та 441 кВт-год (або відповідно 29 та 24 %). Для компресора ця частина деструкції ексергії є досить малою і становить 148 кВт-год (або 8 %). Тобто у прийнятих умовах, суттєвого термодинамічного удосконалення ТНУ можна досягти за рахунок зниження необоротностей при передачі теплоти в першу чергу у проміжному теплообміннику, у випарнику та конденсаторі – тобто зниження температурного напору у цих теплообмінниках. При цьому, проміжний теплообмінник має більшій можливості ніж випарник та конденсатор. У компресорі можливості незначні.

Для додаткового підтвердження правильності висновків на основі запропонованих ключових показників енергетичної ефективності було розраховано значення сезонного коефіцієнта трансформації як відношення сезонної подачі теплоти від ТНУ до сезонного споживання електроенергії ТНУ. Результати розрахунків наведено на рис. 3. Бачимо, що у випадку зниження температурного напору (необоротності) тільки у конденсаторі сезонний коефіцієнт трансформації зріс у порівнянні з базовим (початковим) варіантом ТНУ від 4,28 до 4,63. Якщо зменшити необоротність у випарнику, то коефіцієнт трансформації зростає на більше значення (до 4,75). У випадку підвищення термодинамічної ефективності проміжного теплообмінника шляхом зниження температурного напору у ньому, то у порівнянні з базовим варіантом ТНУ) сезонний коефіцієнт трансформації зростає від 4,28 до 4,87.

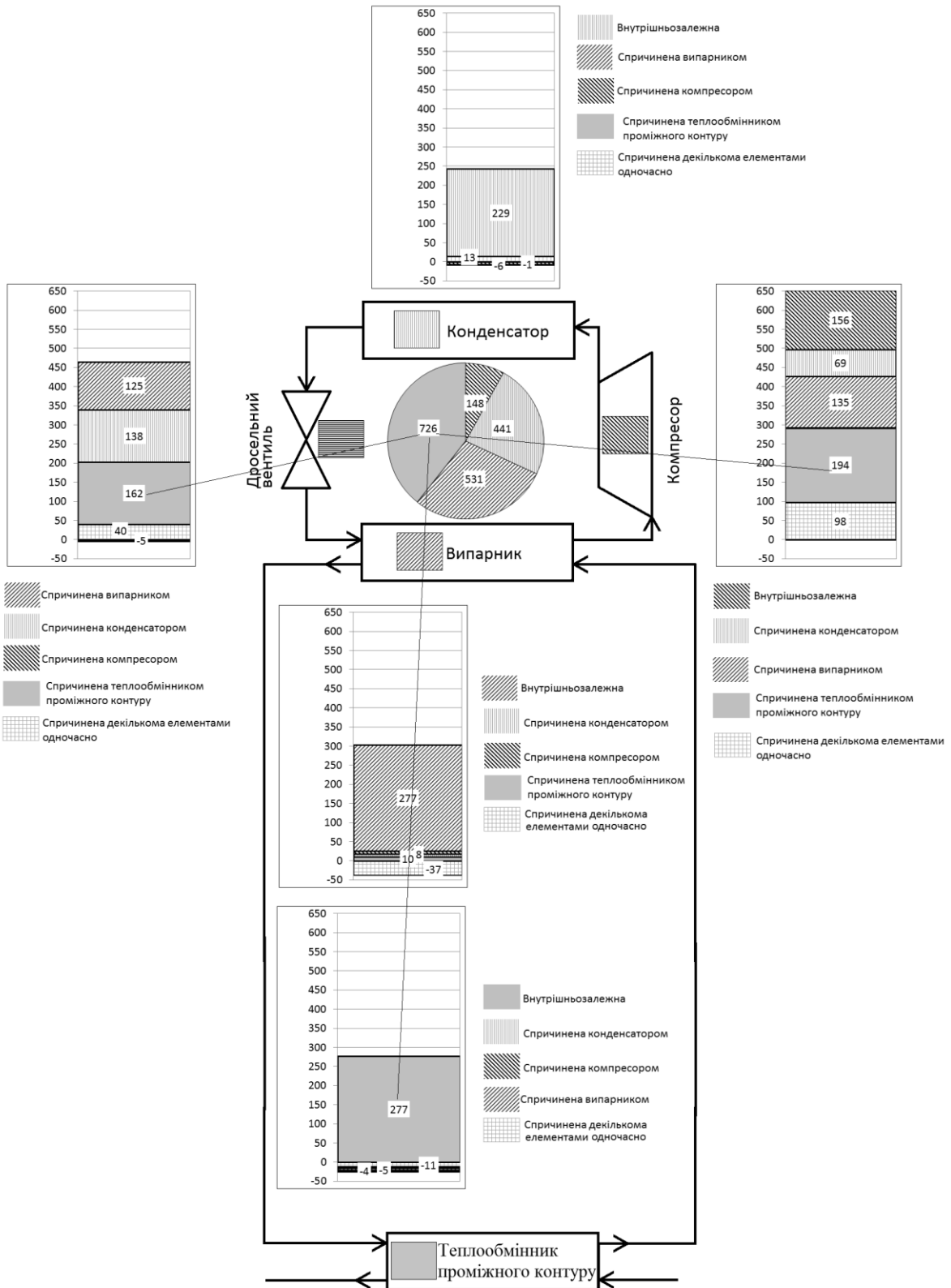


Рис. 2 – Сезонні  $E_{D,k}^{AV,\Sigma,year}$  за опалувальний період значення деструкції ексергії, що можна уникнути за рахунок удосконалення k-го елемента ТНУ типу «вода-вода» на стічних водах  
 Fig. 2 – Seasonal values of exergy destruction which can be avoided by improving the k-th element of wastewater source heat pump system



На рис. 4 показано, що підвищення коефіцієнтів трансформації до значень, які наведені на рис. 3, призводить до відчутного зниження сезонного споживання електроенергії у ТНУ. При цьому, найбільшого зниження (до 12%) досягається саме у випадку підвищення термодинамічної ефективності проміжного теплообмінника. Удосконалення випарника та конденсатора в даному випадку мають менші можливості щодо підвищення енергетичної ефективності ТНУ.

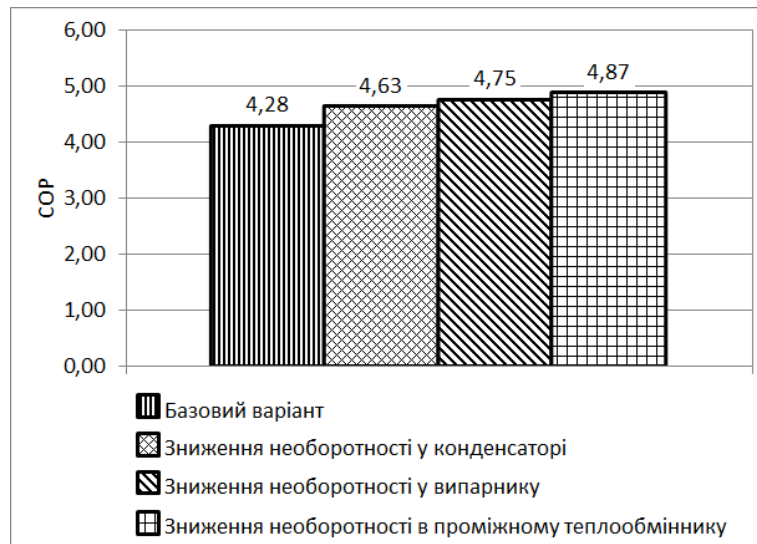


Рис. 3 – Значення сезонного коефіцієнта трансформації (COP) теплонасосної установки для базового варіанту та після зниження необоротностей в окремих її компонентах

Fig. 3 – Seasonal coefficients of performance of the heat pump system for the base case and after decreasing irreversibility within its components

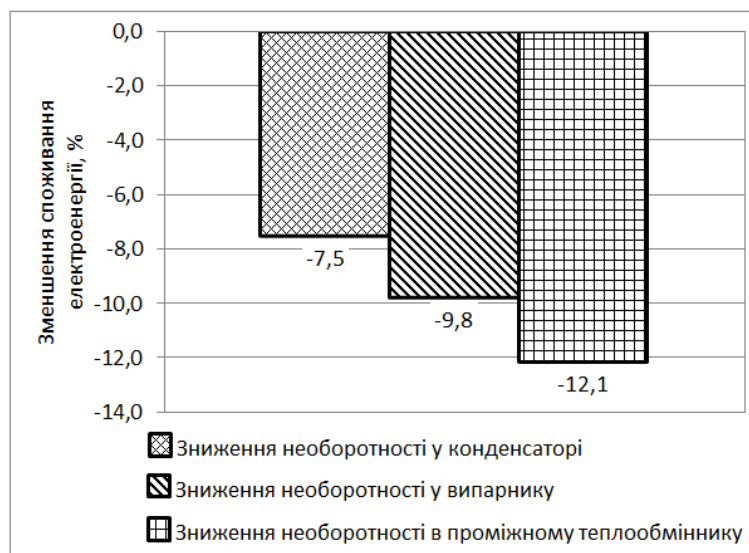


Рис. 4 – Зменшення у порівнянні із базовим варіантом сезонного споживання електроенергії теплонасосною установкою після зниження необоротностей в окремих її компонентах

Fig. 4 – Reduction of seasonal electricity consumption within the heat pump system after decreasing irreversibility within its components in comparison with the base case

## Висновки

1. В роботі наведено та підтверджено доцільність застосування критеріїв поглибленого ексергетичного аналізу (а саме сезонної деструкції ексергії) для оцінювання та обґрунтування рішень з підвищення енергетичної ефективності ТНУ на стічних водах, призначеного для теплозабезпечення будівлі протягом опалювального періоду із урахуванням сезонних коливань потреб енергії та температури низькопотенційного джерела.



2. Показано, що у прийнятих умовах найбільша частка (близько 40 %) сезонної деструкції ексергії, якої можна позбутися у ТНУ, спричинена необоротностями в теплообміннику проміжного контуру. Необоротності у випарнику та конденсаторі спричиняють відповідно 29 та 24 % деструкції ексергії, що можна уникнути. Удосконалення компресора забезпечує всього 8% зниження сезонної деструкції, що можна позбутися. Все це означає, що для підвищення енергетичної ефективності ТНУ в першу чергу потрібно удосконалити проміжний теплообмінник.

3. Отриманий на основі критеріїв поглибленого ексергетичного аналізу висновок підтверджено шляхом розрахунку сезонного споживання електроенергії для різних варіантів удосконалення ТНУ. Показано, що саме удосконалення проміжного теплообмінника забезпечує найбільше (до 12%) зниження сезонного споживання електроенергії.

**Подяка.** Стаття підготовлена в рамках виконання проекту «Розроблення техніко-технологічних схем та систем керування теплозабезпечення населених пунктів на основі термодинамічних підходів» (номер державної реєстрації НДР 0120U102168).

### Список використаних джерел

- [1] Гохштейн Д.П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок / Д.П. Гохштейн. – М.: Энергия, 1969. – 368 с.
- [2] Tsatsaronis, G. Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems/ G. Tsatsaronis, T. Morosuk [Text] // The 4th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering (COTE-2016). Program and Proceedings, Gliwice – Katowice, Silesia, Poland, September, 14-16, 2016. – Gliwice – Katowice, Silesia, 2016. – pp. 75 - 89.
- [3] Morosuk T. New approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines [Text] / T. Morosuk, G. Tsatsaronis // Energy. – 2008. – Vol. 33. – pp. 890–907.
- [4] Morosuk, T. Advanced exergetic evaluation of refrigeration machines using different working fluids [Text] / T. Morosuk, G. Tsatsaronis // Energy. – 2009. – Vol. 34. – pp. 2248–2258.
- [5] Erbay, Z. Application of conventional and advanced exergy analyses to evaluate the performance of a ground-source heat pump (GSHP) dryer used in food drying [Text] / Z. Erbay, A. Hepbasli // Energy Conversion and Management. – 2014. – Vol. 78. – pp. 499–507.
- [6] Харлампида, Д. Х. Структурный термодинамический анализ парокomppressorной холодильной машины [Текст] / Д. Х. Харлампида, В. А. Тарасова // Технические газы. – 2012. – № 5. – С. 57–66.
- [7] Hepbasli, A. A key review of wastewater source heatpump (WWSHP) systems [Text] / A. Hepbasli, E. Biyik, O. Ekren, H. Gunerhan, M. Araz // Energy Conversion and Management. – 2014. –Vol. 88. – pp. 700–722.
- [8] Voloshchuk V. A. Advanced exergetic analysis of a heat pump providing space heating in built environment [Text] / V. A. Voloshchuk // Energetika. – 2017. – 63(3). – pp. 83–92.
- [9] Herbas, T.B Steady-state simulation of vapor-compression heat pump [Text] / T. B. Herbas, E. C. Berlinck, C. A. T. Uriu, R. P. Marques, J. A. R. Parise // International Journal of Energy Research. – 1993. – Vol. 17. – pp. 801–816.

### References

- [1] Hokshtein D.P. Sovremennyye metodyi termodinamycheskoho analiza enerhetycheskykh ustanovok / D.P. Hokshtein. – М.: Enerhyia, 1969. – 368 p.
- [2] Tsatsaronis, G. Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems/ G. Tsatsaronis, T. Morosuk [Text] // The 4th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering (COTE-2016). Program and Proceedings, Gliwice – Katowice, Silesia, Poland, September, 14-16, 2016. – Gliwice – Katowice, Silesia, 2016. – pp. 75 - 89.
- [3] Morosuk T. New approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines [Text] / T. Morosuk, G. Tsatsaronis // Energy. – 2008. – Vol. 33. – pp. 890–907.
- [4] Morosuk, T. Advanced exergetic evaluation of refrigeration machines using different working fluids [Text] / T. Morosuk, G. Tsatsaronis // Energy. – 2009. – Vol. 34. – pp. 2248–2258.
- [5] Erbay, Z. Application of conventional and advanced exergy analyses to evaluate the performance of a ground-source heat pump (GSHP) dryer used in food drying [Text] / Z. Erbay, A. Hepbasli // Energy Conversion and Management. – 2014. – Vol. 78. – pp. 499–507.
- [6] Kharlampydy, D. Kh. Strukturniy termodinamycheskij analiz parokompessornoj holodil'noj mashiny [Text] / D. Kh. Kharlampydy, V. A. Tarasova // Tekhnycheskye hazyi. – 2012. – no.5. – pp. 57–66.
- [7] Hepbasli, A. A key review of wastewater source heatpump (WWSHP) systems [Text] / A. Hepbasli, E. Biyik, O. Ekren, H. Gunerhan, M. Araz // Energy Conversion and Management. – 2014. –Vol. 88. – pp. 700–722.
- [8] Voloshchuk V. A. Advanced exergetic analysis of a heat pump providing space heating in built environment [Text] / V. A. Voloshchuk // Energetika. – 2017. – 63(3). – pp. 83–92.
- [9] Herbas, T.B Steady-state simulation of vapor-compression heat pump [Text] / T. B. Herbas, E. C. Berlinck, C. A. T. Uriu, R. P. Marques, J. A. R. Parise // International Journal of Energy Research. – 1993. – Vol. 17. – pp. 801–816.



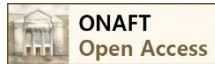
УДК 62.791

## REVIEW AND COMPARATIVE ANALYSIS OF COMPLEX DIGITAL ELECTRICAL METERING DEVICES USED ON MODERN MERCHANT FLEET

Gurov K. A.<sup>1</sup>, Savolova E. V.<sup>2</sup>, Yarmolovych V. Y.<sup>3</sup>, Ezerovych D. M.<sup>4</sup><sup>1</sup> Компанія NedaMaritimeAgencyCo, Греція<sup>2,3</sup> Одеський національний політехнічний університет, Одеса, Україна<sup>4</sup> Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, Одеса, УкраїнаORCID: <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2598-3229>, <sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9266-9323>,<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0708-2972>, <sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0368-2089>E-mail: <sup>1</sup> [gurovkonstantin@gmail.com](mailto:gurovkonstantin@gmail.com), <sup>2</sup> [elvira.onaxt@gmail.com](mailto:elvira.onaxt@gmail.com), <sup>3</sup> [vyy0147@gmail.com](mailto:vyy0147@gmail.com), <sup>4</sup> [dme85928@gmail.com](mailto:dme85928@gmail.com)

Copyright © 2020 by author and the journal "Automation of technological and business – processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i2.1806>

**Анотація.** Для моніторингу та оптимізації роботи торговельних суден створюється віддалений доступ до систем корабля, так званих мереж «судно-берег». Це вимагає використання нових комплексних цифрових приладів. Вибір правильного і оптимального пристрою з доступних на сучасному ринку - завдання не з легких. У цій статті представлений огляд типових аналізаторів електричних величин, використовуваних для створення онлайн систем збору і передачі даних. Порівняльний огляд трьох пристроїв різних виробників, які в даний час широко використовуються (Phoenix Contact, Німеччина; ABB, Швейцарія; DEIF, Данія). Переглянуті дані складаються в таблицю. Наведено приклади використання цих пристроїв на конкретних суднах.

Для моніторингу та оптимізації роботи торговельних суден встановлюється віддалений доступ до судових систем, так званих мереж «судно-берег». Це вимагає використання нових складних цифрових електричних вимірювальних приладів. Вибір правильного та оптимального пристрою з доступних на поточному ринку не є легким завданням. У цій статті подано огляд типових аналізаторів електричних значень, які використовуються для створення онлайн-систем збору та передачі даних. Представлено порівняльний огляд трьох пристроїв, які в даний час широко використовуються різними виробниками (Phoenix Contact, Німеччина; ABB, Швейцарія; DEIF, Данія). Переглянуті дані складаються в таблицю. Наведено приклади використання цих пристроїв на конкретних суднах.

**Abstract.** To monitoring and optimization the operation of merchant vessels, remote access to the ship's systems, the so-called "ship-shore" networks, is being established. This requires the use of new complex digital electrical metering devices. Choosing the right and optimal device from the available on the current market is not an easy task. This article provides an overview of the typical electrical value analyzers used to create online data collection and transmission systems. A comparative review of the three devices currently widely used by different manufacturers (Phoenix Contact, Germany; ABB, Switzerland; DEIF, Denmark). The data reviewed is compiled into a table. Examples of the usage of these devices on specific vessels are given.

**Ключові слова:** аналізатор, лічильник енергії, мережі, торговий флот, інтерфейс, дистанційне управління, точність, модулі зв'язку, вимірювання, дані.

**Keywords:** analyzer, energy meter, networks, merchant fleet, interface, remote control, accuracy, communication modules, measurements, data.

### Introduction

At the moment, multiple electrical parameters analyzers are widely introduced - digital devices that allow not only to fix parameters, but also to transmit information about the measured signals, creating a network of remote control. This replacement saves space and money, as one device is installed instead of the n-quantity (A, V, W, Hz, cosΦ, etc.). It also solves the task of implementing an online data collection and transmission system.



### The purpose of the work

In this article, we want to talk about some of these devices successfully implemented on merchant fleet (especially three sister-ships (Tsuneishi Shipbuilding Co., Ltd. Shipyard Ship No's: SS197, SS198; Namura Shipbuilding Co., Ltd. Shipyard Ship No: S414)).

Here's an overview of three standard complex digital electrical metering devices:

1. The **EEM-MA600 (maker Phoenix Contact, Deutschland)** is a highly accurate energy meter for measuring electrical parameters in low voltage installations up to 700V. It is designed for front-panel installation and supports the measurement, counting, and display of all electrical parameters in 1, 2, and 3-phase networks with and without neutral conductors (symmetrical and asymmetrical). The buttons located on the front of the device allow fast, direct access to the required parameters as well as device configuration. The device can be expanded using the special function and communication modules and can be configured using communication modules (Ethernet, PROFIBUS, MODBUS). The device can also be used to record the total harmonic distortion (THD) of the currents and voltages as well as the content of individual harmonic (odd) vibrations. Values up to the 25<sup>th</sup> harmonic can be shown on the display. The display up to the 63<sup>rd</sup> harmonic is possible via the MODBUS registers. A trend calculation can be performed for the real and reactive power, and alarm management can be activated (extension module EEM-2DIO-MA600 required) [1].

*The following parameters can be measured or monitored:*

Current:

– actual values I1, I2, I3, IN; average value/maximum value I1, I2, I3, IN; harmonic content and content of individual odd harmonics (displays up to 25<sup>th</sup>).

Voltages:

– actual phase/phase value (U12, U23, U31); actual phase/N value (V1, V2, V3); average value/maximum value for phase/phase (U12, U23, U31) and phase/N (V1, V2, V3); harmonic content and content of individual odd harmonics (displays up to 25<sup>th</sup>).

Frequency:

Real, reactive and apparent power:

– actual value for each phase (P1, P2, P3, Q1, Q2, Q3, S1, S2, S3); total actual value ( $\Sigma P$ ,  $\Sigma Q$ ,  $\Sigma S$ ); average value/maximum value ( $\Sigma P$ ,  $\Sigma Q$ ,  $\Sigma S$ ); trend ( $\Sigma PPR$ ,  $\Sigma QPR$ ,  $\Sigma SPR$ ).

Power factor:

– actual value for each phase (PF1, PF2, PF3); total actual value ( $\Sigma PF$ ); average value/maximum value ( $\Sigma PF$ ).

Energy (power meter):

– real energy (EA +/-); reactive energy (ER +/-); apparent energy (ES).

Harmonics:

– total harmonic distortion of currents I1, I2, I3, IN; total harmonic distortion of line voltage U12, U23, U31; total harmonic distortion of line voltage against N V1, V2, V3; individual harmonic content up to 63<sup>rd</sup>.

For currents I1, I2, I3.

For line voltages (U12, U23, U31).

For line voltages against N (V1, V2, V3).

Temperatures:

– internal; external via 3 PT100 temperature sensors.

Alarm setting:

– for all parameters (extension module EEM-2DIO-MA600 required).

*Displaying measured values:*

I/°C button:

– currents (I1, I2, I3, IN), real energy (EA); currents (I1, I2, I3, IN), average value (I), real energy (EA); temperatures (when extension module EEM-TEMP-MA600 is connected).

U/F button:

– line voltages (U12, U23, U31), frequency (F), real energy (EA); line voltages against N (V1, V2, V3), frequency (F), real energy (EA); line voltages (U12, U23, U31), average value (U), real energy (EA); line voltages against N (V1, V2, V3), average value (V), real energy (EA).

P/PF button:

– real power for each phase (P1, P2, P3), total real power ( $\Sigma P$ ), real energy (EA); reactive power for each phase (Q1, Q2, Q3), total reactive power ( $\Sigma Q$ ), real energy (EA); apparent power for each phase (S1, S2, S3), total apparent power ( $\Sigma S$ ), real energy (EA); power factor for each phase (PF1, PF2, PF3), total power factor ( $\Sigma PF$ ), real energy (EA); real power trend ( $\Sigma PPR$ ); reactive power trend ( $\Sigma QPR$ ); apparent power trend ( $\Sigma SPR$ ).

MAX/AVG button:

– average value/maximum value for currents (I1, I2, I3, IN), real energy (EA); average value/maximum value for line voltages phase/phase (U12, U23, U31), average frequency value (F), real energy (EA); average value/maximum value for line voltages phase/N (V1, V2, V3), average frequency value (F), real energy (EA); average value/maximum real power value ( $\Sigma P$ ); average value/maximum reactive power value ( $\Sigma Q$ ); average value/maximum apparent power value ( $\Sigma S$ ).

H button:



– total harmonic distortion of currents (THD I1, THD I2, THD I3, THD IN), real energy (EA); total harmonic distortion of phase/phase (THD U12, THD U23, THD U31) conductor voltages, real energy (EA); total harmonic distortion of phase/N (THD V1, THD V2, THD V3) conductor voltages, real energy (EA); harmonic content for currents (I1, I2, I3, IN), real energy (EA); harmonic content for conductor voltages L/L (U12, U23, U31), real energy (EA); harmonic content for line voltages L/N (V1, V2, V3), real energy (EA).

E button:

– positive real energy (EA +); positive reactive energy (ER +); apparent energy (ES); negative real energy (EA-); negative reactive energy (ER-); operating hours.

**2. The M2M (maker ABB, Switherland) network analyser** is an instrument that measures of the main electric quantities on 3-phase and monophasе networks designed for the monitoring and the local or remote analysis of: electrical parameters of systems in low or medium voltage and system energy consumption [2].

*All of the M2M series models are able to measure and process the quantities shown below:*

- voltages (phase neutral and concatenated) and relative peak values;
- currents and relative peak values;
- power factors or PF phases and the 3-phase system, with distinction icon between the inductive and capacitive load;
- frequency (measured on L1-N phase);
- active, reactive and apparent phase energies and the 3-phase system on 2 quadrants (with automatic recognition function of the AT directions);
- active, reactive and apparent power phases and the 3-phase system on 4 quadrants (monitoring of energy absorbed and generated by the system);
- average power values on a time period programmed by the user;
- maximum calculated demand on active and apparent power;
- voltage and current THdF expressed in absolute and percent values;
- T1 increase total operating hour counter and T2 decrease partial hour counter;
- balance of active, reactive and apparent energy of 3-phase system, balance = absorbed energy - generated energy;
- balance of the "partial" active, reactive and apparent energies of the 3-phase system on 4 quadrants in a period that can be programmed by the user, balance = energy absorbed - energy generated;

*All of the models have the following in common:*

- multivoltage supply voltage;
- multilanguage display with scrolling text;
- self-diagnostic function for the installation control;
- setting of a safety password;
- T1 and T2 hour counter.

**3. The MIC (maker DEIF, Denmark) multi-instrument** is a microprocessor-based measuring unit providing measurement of all electrical quantities on a 1 or 3-phase electric energy distribution network. The measurements are shown on the built-in display. The MIC also has an RS485 interface that supports data exchange with a control system via Modbus RTU protocol. The MIC measures true RMS values on all 1 or 3-phase network topologies with or without neutral and with both balanced and unbalanced load. The MIC can replace a large number of standard analogue instruments in all electrical measuring applications. It can be applied both as a regular instrument and as a remote value-reading and control unit transmitting all measured values to the remote control system via the serial interface. The MIC contains all necessary measuring circuits and presents all values on a display with blue backlight. The display has 4 digits resolution for all measurements with the exception of the energy counter (9 digits). The backlight "on-time" is selectable. The MIC is a flexible measuring unit that enables the user to easily adapt the instrument to the individual application. Counter reset and change of the instrument settings can be password protected [3].

*Measured and calculated values:*

Voltage (phase-neutral):

- actual voltage of each phase and average voltage.

Voltage (phase to phase):

- actual voltage of each line and average voltage.

Current:

- actual current of each phase, average current and neutral current.

Active power:

- actual active power of each phase and total power.

Reactive power:

- actual reactive power of each phase and total reactive power.

Apparent power:

- actual apparent power of each phase and total apparent power.

Power factor:

- actual power factor of each phase and system average power factor.

Frequency:

- actual frequency of L1.

**Power quality:**

- voltage/current unbalance factor, total harmonics distortion of voltage/current of each phase and total harmonics distortion of average voltage/current.

**Energy counter:**

- the MIC has 8 counters: export/import kWh, export/import kVAh, absolute sum of export/import kWh, algebraic sum of export/import kWh, absolute sum of export/import kVAh, algebraic sum of export/import kVAh.

**Statistics data:**

- max/min values of voltage, current, total power, total reactive power, total apparent power, power demand, power factor and frequency.

**Running hour:**

- meters the duration of the operation.

**Real time clock:**

- date and time.

The appearance of the devices is shown in Figure 1.



**Figure 1 - a) EEM-MA600, Phoenix Contact; b) M2M, ABB; c) MIC, DEIF;**

The specifications of these devices can be presented as a composite table (Table 1).

**Table 1 – The specifications of these devices**

	<b>EEM-MA600 (Phoenix Contact)</b>	<b>M2M (ABB)</b>	<b>MIC (Deif A/S)</b>
1	2	3	4
Supply			
Supply voltage range	110...400VAC ±10% 120...350VDC ±20%	24...240VAC/VDC	85...264VAC 50/60Hz...48/100...280V DC
Nominal power consumption	<10VA (without extension modules) <20VA (with extension modules)	7VA (max)	≤ 2VA
Dimension W/H/D	96 x 96 x 82mm	96 x 96 x 77mm	92 x 92 x 78mm
Installation depth	60 - 80mm	57mm	64mm
Weight	400g	400g	350g
Voltage measurement			
Input voltage range	18...700VAC phase/phase 11...404VAC phase/neutral	10...500VAC phase/neutral	10...480VAC phase/phase up to 230VAC phase/neutral
Accuracy	0,20%	0,50%	0,20%

**Table 1 (continuation)**

1	2	3	4
Current measurement Input current (via external transformer) Overload capacity Accuracy	≤9999A primary 1A or 5A secondary 10A (continuous) 0,20%	1...10000A primary 50mA...5A secondary 10A (continuous) 0,50%	1A or 5A 10A (continuous) / 100A (1 sec) 0,20%
Power measurement Measuring range Accuracy Real energy Reactive energy	0...8000MW/Mvar/MVA 0,50% Class 0.5S (IEC 62053-22) Class 2 (IEC 62053-23)	0...10GWh/Varh/Vah single phase 0...30GWh/Varh/Vah 3-phase 1% Class 1(IEC 62053-23)	0...10000MW/Mvar/MVA 0,50% Class 1 (EN 61036) Class 2 (EN 61268)
Input data Measuring principle Measured value	True r.m.s. value measurement (TRMS) up to 63 Harmonic AC sine (45Hz...65Hz)	Sampling TRMS 45Hz...65Hz	3-phase TRMS measurement 45Hz...65Hz
Output data	Optional for special function/communication module	2 outputs programmable with pulse or threshold alarms	RS485 serial output Modbus RTU protocol. Optional 2 digital pulse/limit outputs + 2relays
Electrical isolation Rated insulation voltage Test voltage	<300VAC (L/N) surge V category III ≥300VAC...600VAC surge V category II 3,5kVAC (50Hz, 1 min) safe isolation	3,7kVAC (1 min)	EN 61010-1 category III 2,2kV
Connection data Conductor cross section (current) Conductor cross section (voltage and other) Connection method Tightening torque	0,5...6mm <sup>2</sup> 0,5...2,5mm <sup>2</sup> screw connection 0,4Nm	up to 6mm <sup>2</sup> up to 2,5mm <sup>2</sup> screw connection 0,4Nm	up to 5mm <sup>2</sup> pluggable block 0,5Nm
Ambient conditions Ambient temperature (operation) Ambient temperature (storage/transport) Permissible humidity (operation)	-10degC...+55degC (14degF...131degF) -20degC...+85degC (-4degF...185degF) max 95%	-5degC...+55degC (23degF...131degF) -10degC...+60degC (14degF...140degF) max 93% (without condensation) at 40degC	-5degC...+55degC (23degF...131degF) -40degC...+70degC (-40degF...158degF) max 95% (without condensation)
Degree of protection Frontal At terminals	IP 52 IP 30	IP 50 IP 25	IP 40 IP 20
Hour counters	+	+	+



### Findings

Based on practical experience in the operation of ship's electrical systems, let's give examples of the specific use of the above devices. In particular, the energy meters EEM-MA600 (Phoenix Contact) were installed in online data acquisition system (DAQ Vector) to control parameters of all generator plants on board of motor vessel (bulk carrier, 2016 year build (Japan), deadweight 82000mt). Chosen due to higher supply voltage (no need to install additional transformer), high level of electrical isolation and high accuracy class of measurements. The multi-instrument MIC (DEIF) used in power control board of Ballast Water Treatment System (TechCross) to control output energy loads from all electrolyzing units on board of motor vessels (bulk carriers, 2016 year build (China), deadweight 82000mt). Chosen due to RS485 interface that supports data exchange with a control system. The network analyzer M2M (ABB) commonly used in different kind of control boards of vessel machineries such as auxiliary composite boilers, steering gears, fuel and oil purifiers, etc. Due to smaller installation size and alarm outputs.

It should be noted that despite the successful introduction of digital integrated electrical metering devices, analog devices still do not lose their relevance. In particular, for local reading data that do not require further transmission of data to the remote control network, replacing all devices with digital analogues is not necessary.

### References

- [1] User manual for energy meter for single, two and three-phase networks UM EN EEM-MA600, published by PHOENIX CONTACT GmbH & Co. KG Flachmarktstraße 8, 32825 Bloomberg Deutschland. [www.phoenixcontact.com](http://www.phoenixcontact.com)
- [2] Assembly and use instructions for network analyzer M2M (2CSG299883R4052), published by ABB SACE A division of ABB S.p.A. Vialledell'Industria 18, 20010 Vittuone (MI). [www.abb.com](http://www.abb.com)
- [3] Installation instructions and reference handbook for multi-instrument MIC (4189320009H), published by DEIF A/S, Frisenborgvej 33, DK-7800 Skive, Denmark. The serial interface manual, the data sheet and the free utility software. [www.deif.com](http://www.deif.com)

УДК 658.5

## СТАН РОЗВИТКУ ТА ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ВИПРОМІНЮВАННЯ DFB ЛАЗЕРІВ

Похлєбіна Н.О.<sup>1</sup>, Мазур О.В.<sup>2</sup>, Kovalchuk D.<sup>3</sup>

Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, Україна

ORCID: <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9789-608X>, <sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7104-9010>,

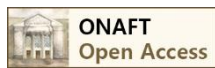
<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0549-5244>

E-mail: <sup>1</sup> [pohlebina.odessa@gmail.com](mailto:pohlebina.odessa@gmail.com), <sup>2</sup> [mazur.a.v.ua@gmail.com](mailto:mazur.a.v.ua@gmail.com), <sup>3</sup> [radiolomaster@gmail.com](mailto:radiolomaster@gmail.com)

Copyright © 2020 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i2.1807>

**Анотація.** Робота присвячена дослідженню напівпровідникових лазерів, їх функціонуванню, формалізації процесу як об'єкту керування. Розглянуті системи автоматичного керування напівпровідниковими лазерними діодами з розподіленим зворотнім зв'язком, зокрема одночастотні DFB- (англ. Distributed feedback laser «з розподіленим зворотнім зв'язком») лазерні діоди, які використовуються, як в якості високостабільних джерел оптичного сигналу у системах передачі даних так і джерел випромінювання із змінною довжиною хвилі випромінювання. Приведені основні відомості про лазерні діоди, їх характеристики та класифікація за фізичним станом. Розглянуті питання використання DFB-лазерів в якості джерела когерентного електромагнітного випромінювання зі змінною довжиною хвилі випромінювання. Представлена структурна схема типового напівпровідникового лазерного DFB-модуля, з взаємозв'язками між його основними компонентами. Проведена параметризація процесу формування лазерного випромінювання до рівня параметричної схеми. Представлена параметрична схема процесу як об'єкту керування та структурна схема моделі процесу. Проведено аналіз структурної організація існуючих систем автоматичного



керування. Розглянуті принципи побудови існуючих систем автоматичного керування, які використовуються для формування когерентного електромагнітного випромінювання в системах передачі даних за технологією оптичного мультиплексування CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) та DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Виявлено основні недоліки та розглянуті можливі рішення для удосконалення структури і функцій систем автоматичного керування процесом. Представлені структурні схеми перспективних систем автоматичного керування побудованих за принципами інваріантності та автономності.

**Abstract.** The work is sanctified to research of semiconductor lasers, their functioning, formalization of the process as an object of control. The systems of automatic control are considered by semiconductor laser diodes with distributed feedback are considered, in particular single-frequency DFB (Distributed feedback laser) laser diodes, which are used both as highly stable sources of optical signal in data transmission systems and radiation sources with variable wavelengths. The basic information about laser diodes, their characteristics and classification by physical condition is given. The issues of using DFB lasers as a source of coherent electromagnetic radiation with a variable wavelength of radiation are considered. The block diagram of a typical semiconductor laser DFB module is presented, with interrelations between its main components. The parameterization of the process of laser radiation formation to the level of the parametric circuit is carried out. The parametric scheme of the process as a control object and the block diagram of the process model are presented. The analysis of the structural organization of the existing automatic control systems is carried out. The principles of construction of existing automatic control systems, which are used for the formation of coherent electromagnetic radiation in data transmission systems by optical multiplexing technology CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) and DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) are considered. The main shortcomings are identified and possible solutions for improving the structure and functions of automatic process control systems are considered. Structural schemes of perspective automatic control systems built on the principles of invariance and autonomy are presented.

**Ключові слова:** лазерний DFB-модуль, напівпровідникові лазери, системи автоматичного керування.

**Keywords:** laser DFB-module, semiconductor lasers, automatic control systems.

## Вступ

Різні типи лазерів, створені до теперішнього часу, мають широкий спектр фізичних і робочих характеристик. Якщо лазери класифікують за фізичним станом активної середовища, то їх називають твердо тільними, рідинними або газовими лазерами. До особливого типу відносять такі, в яких активне середовище складається з вільних електронів, що рухаються з релятивістськими швидкостями через просторово-періодичне магнітне поле (лазери на вільних електронах). Якщо лазери класифікують по довжині хвилі генерується випромінювання, то говорять про лазерах інфрачервоного (ІК), видимого, ультрафіолетового (УФ) або рентгенівського діапазонів. Відповідні довжини хвиль змінюються в межах від «1 мм (від області міліметрових хвиль) до «1 нм (до верхньої межі жорсткого рентгенівського випромінювання). Розкид довжин хвиль може досягати, таким чином, 10<sup>6</sup> (нагадаємо, що видимий діапазон відповідає менш ніж двохкратній зміні довжин хвиль - приблизно від 400 до 700 нм). Потужності випромінювання на виході лазерів перебивають ще більш широкий діапазон величин. У безперервних лазерів типові потужності становлять від декількох мВт - в лазерах, що використовуються як джерела оптичних сигналів, до декількох МВт ( «5 МВт до теперішнього часу) - в лазерах, необхідних для деяких військових застосувань (наприклад, в якості зброї спрямованої енергії). У імпульсних лазерів пікова потужність може бути набагато вище, ніж у безперервних, досягаючи таких гігантських величин, як тисячі ТВт (10<sup>15</sup>Вт)! Крім того, тривалість імпульсу лазерного випромінювання може змінюватися в широких межах - від декількох мс, типових для так званого режиму вільної генерації (без якого б то не було елементу для модуляції добротності або синхронізації мод), до порядку 10 фс (1 фс = 10<sup>-15</sup>), що типowo для деяких лазерів з синхронізацією мод. Сильно можуть змінюватися і геометричні розміри лазерів. У термінах довжини резонатора, наприклад, ця довжина може бути малою, ~ 1 мкм, - для найбільш коротких лазерів, і величезною, порядку декількох кілометрів, - для найбільш протяжних (лазерів для проведення геодезичних досліджень).

Широта діапазону фізичних або робочих характеристик лазерів є як перевагою, так і недоліком. Якщо говорити про застосування лазерів, то широкий спектр їх параметрів забезпечує величезний потенціал можливого використання в різних областях фундаментальних і прикладних досліджень[1].

В статті розглянуті напівпровідникові лазери як об'єкти керування, зокрема одно частотні лазерні діоди, що представляють собою модифікацію плоского резонатора Фабрі-Перо, до якого додана періодична просторова модуляційна структура налаштована на відповідну довжину хвилі. В DFB лазері (англ. Distributed feedback laser «лазер з розподіленим зворотним зв'язком»), вона поєднана з активною областю, а в DBR лазері (англ. Distributed Bragg Reflector Laser лазер з розподіленим бреггівськими відбивачем), вона винесена за межі активної області.

Напівпровідникові DFB-лазери з розподіленим зворотнім зв'язком на відміну від лазерів з інтерферометром Фабрі-Перо працюють в одночастотному режимі генерації. Їх зручно використовувати в якості джерела із зміною частотою випромінювання, оскільки вони мають помітну температурну залежність частоти (довжини хвилі) генерації. Коефіцієнт температурної залежності довжини хвилі випромінювання типового DFB-лазера становить 0.1 нм / оС. Виходячи з того, що діапазон робочих температур деяких лазерів досягає 100 – 120 оС можлива зміна довжини хвилі може досягати 10 нм.



Для збільшення діапазону перебудови використовуються повністю моноблочні інтегровані конструкції, що містять ґрати з декількох DFB-лазерів, об'єднаних в один блок. Так, блок з восьми паралельно розташованих DFB-лазерів і об'єднаних багатомодовим хвильовим об'єднувачем дозволяє забезпечити діапазон перебудови частоти до 60 нм.

DFB-лазери зазвичай використовуються для формування оптичних сигналів за технологією оптичного мультиплексування DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) при цьому ширина полоси випромінювання такого лазера може складати менше 1 нм і вимоги до стабільності довжини хвилі випромінювання такого лазера можуть бути менш ніж  $\pm 1$  нм. При використанні для аналітичних задач для таких систем, окрім жорстких вимог до довжини хвилі випромінювання додаються ще досить жорсткі вимоги по формуванню випромінювання заданої потужності. Таким чином проблема створення систем керування лазерним модулем з підвищеною динамічною точністю досить актуальна.

### 1. Схема лазерного DFB-модуля, метайого функціонування, змістовний опис

Метою функціонування лазерного модуля є генерація когерентного електромагнітного випромінювання з заданими спектральними характеристиками: центральною довжиною хвилі спектра випромінювання, шириною цього спектра та його потужністю.

В DFB-лазері, як і в будь-якому лазері напівпровідникового типу генерація випромінювання незмінно супроводжується небажаними теплоутворюючими процесами. Значна частина електричної енергії яка підводиться до лазера перетворюється в теплову енергію, що призводить до підвищення температури випромінювача, зміни довжини хвилі випромінювання та зменшення вихідної потужності лазера, тобто його ККД. Ця теплова енергія повинна відводитись у навколишнє середовище. Через погану теплопровідність напівпровідників для лазерних діодів потужністю понад 5 мВт пасивного відводу тепла недостатньо і для їх охолодження та підтримки температури на заданому рівні в складі лазерного модуля зазвичай використовуються термоелектричні перетворювачі на елементах Пельтьє (ТЕП), що відводять або підводять тепловий потік до лазерного діода в залежності від напрямку і величини струму, що протікає крізь ТЕП.

Основними параметрами ТЕП є робочий струм і напруга, а також холодопродуктивність яка вимірюється при стандартній різниці температур між його холодною та гарячою поверхнями  $25^{\circ}\text{C}$ . В такому режимі холодопродуктивність ТЕП складає, 55-60% споживаної електричної потужності.

Лазерний модуль зазвичай розташовується в металокерамічному герметичному корпусі, який забезпечує відвід тепла в навколишнє середовище. Окрім лазерного діода в ньому звичай розташовані наступні елементи модуля:

- контрольний фотодіод, який забезпечує вимірювання інтенсивності випромінювання лазерного діода;
- терморезистор, який дозволяє контролювати температуру лазерного діода;
- термоелектричний перетворювач на ефекті Пельтьє (ТЕП), який є виконавчим елементом схеми термостабілізації лазерного діода;
- теплопровід, який забезпечує відвід теплового потоку від лазерного діода.

Схема технічної структури лазерного модуля представлена на рисунку 1.

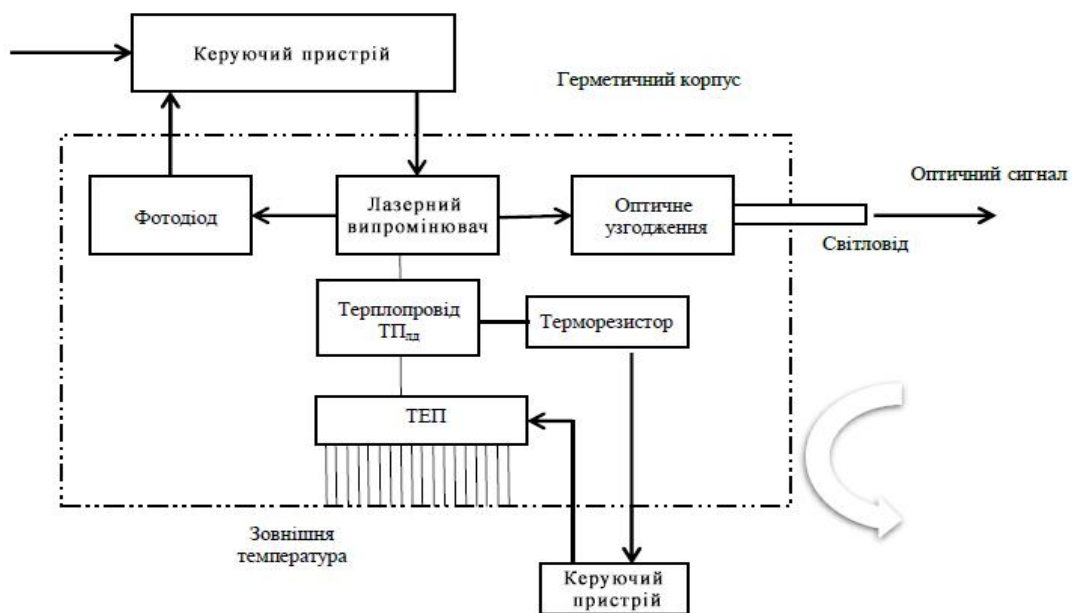


Рис. 1 – Схема технічної структури лазерного модуля

Потужність випромінювання лазерного діода пропорційна струму який протікає крізь нього (струму накачки). При струмі накачки нижче порогового лазерний діод працює в режимі світлодіода випромінюючи некогерентне



випромінювання з напівшириною спектру 20-25 нм, при струмі вище порогового діод переходить в режим генерації когерентного випромінювання, ширина спектру якого значно вужча і зазвичай становить одиниці нанометрів або навітьдесяті долі нанометрів. Потужність випромінювання прямо пропорційна струму крізь лазерний діод(струму накачки лазера). Положення центральної довжини хвилі спектру випромінювання напівпровідникового лазерного діода має сильну залежність від його температури та струму накачки. Залежність потужності  $P_{\text{вип}}$  і довжини хвилі  $\lambda$  випромінювання DFB-лазера від температури і струму накачки приведена на рисунку 2 [7].

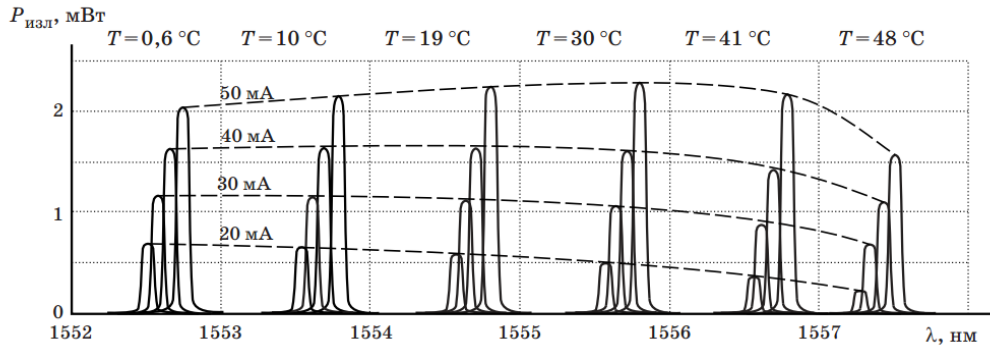


Рис. 2 – Залежність потужності  $P_{\text{вип}}$  і довжини хвилі  $\lambda$  випромінювання DFB-лазера від температури  $T$  і струму накачки  $I$

## 2. Формалізація ТП до рівня параметричної схеми

Проведемо параметризацію схеми. Результати параметризації наведені на рисунку 3.

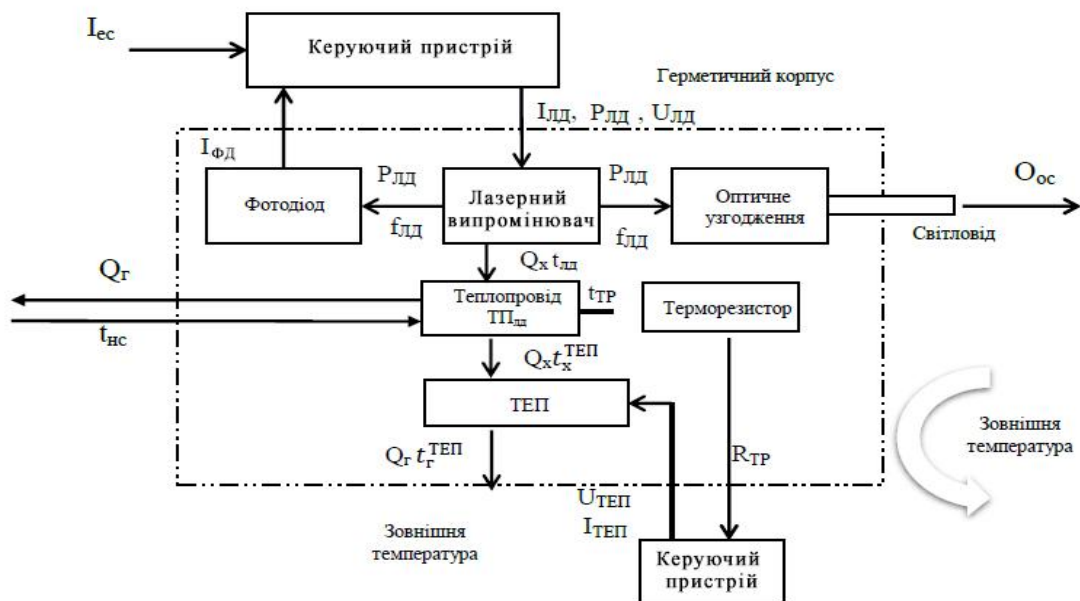
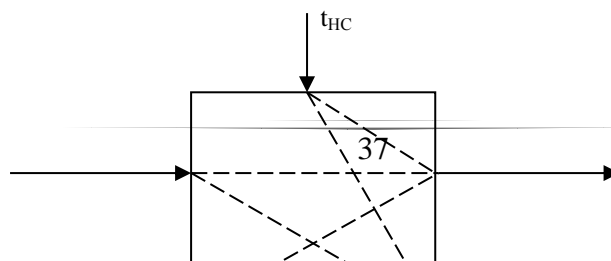


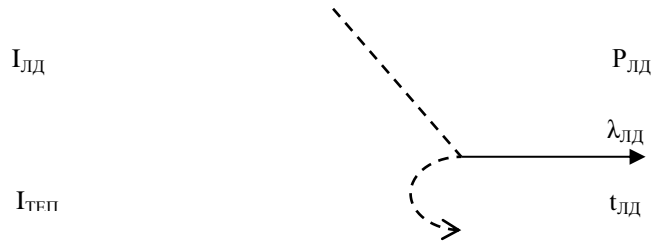
Рис. 3 – Параметризована схема технічної структури

Позначення на параметризованій схемі:  $I_{\text{ес}}$  – електричний сигнал,  $t_x^{\text{ТЕП}}$  – температура холодної поверхні ТЕП,  $t_r^{\text{ТЕП}}$  – температура гарячої поверхні ТЕП,  $I_{\text{лд}}$  – струм лазерного діода,  $I_{\text{теп}}$  – струм термоелектричного перетворювача,  $R_{\text{тр}}$  – опір терморезистора,  $t_{\text{нс}}$  – температура навколишнього середовища,  $f_{\text{лд}}$  – довжина хвилі лазерного випромінювання,  $P_{\text{лд}}$  – потужність випромінювання лазера,  $Q_x$  – холодний потік ТЕП (холодопродуктивність),  $Q_r$  – гарячий потік ТЕП,  $O_{\text{ос}}$  – оптичний сигнал.

## 3. Формалізація процесу як об'єкту керування, його структурна схема, опис змінних та характеру їх причинно-наслідкових зв'язків

Параметрична схема процесу формування лазерного випромінювання як об'єкту керування (ОК) представлена на рисунку 4.



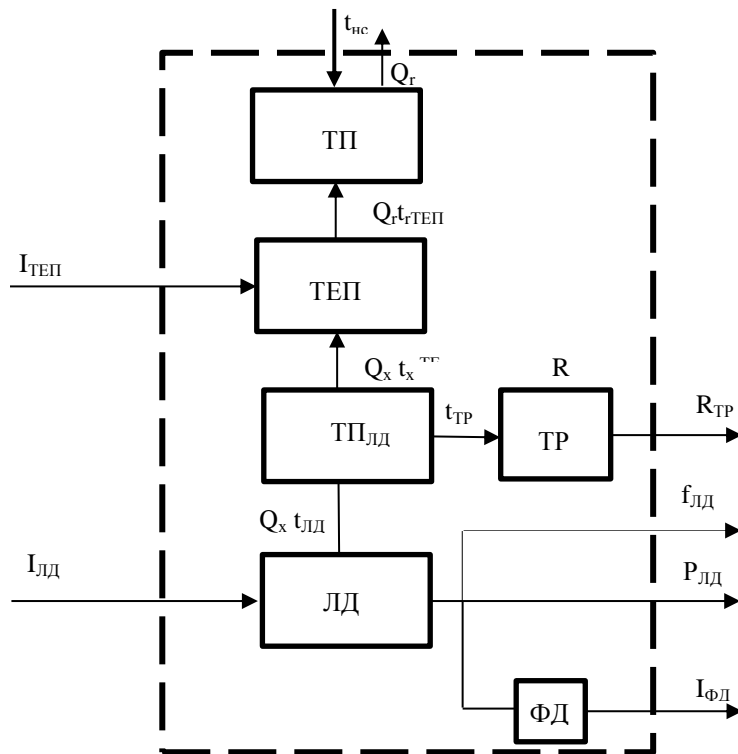


**Рис. 4 – Параметрична схема лазерного випромінювача як об'єкту керування**

В якості регульованих змінних процесу виступають потужність випромінювання  $P_{LD}$  та центральна довжина хвилі спектру випромінювання. Керування потужністю випромінювання ЛД здійснюється зміною рівня струму накачки  $I_{LD}$  ЛД. Керування довжиною хвилі випромінювання здійснюється за рахунок зміни напругу та рівня струму ТЕП, яка призводить до зміни рівня температури ЛД та, відповідно, до зміни довжини хвилі.

За даними досліджень [7] представлених на рисунку 2 в процесі формування лазерного випромінювання простежуються суттєві перехресні взаємозв'язки. Зміна рівня струму накачки призводить не тільки до пропорційної зміни потужності випромінювання, але й досить суттєво впливає на положення центральної довжини хвилі спектра випромінювання. В свою чергу зміна рівня та напругу струму ТЕП досить суттєво впливає на ККД лазерного діода і відповідно на потужність його випромінювання.

Структурна схема ТП формування когерентного електромагнітного випромінювання в лазерному модулі як об'єкту керування представлена на рисунку 5.



**Рис. 5 – Структурна схема моделі**

Позначення до схеми: ТП – теплопровід, ТЕП – термоелектричний перетворювач, ТП<sub>ЛД</sub> – теплопровід лазерного діода, ТР – терморезистор, ЛД – лазерний діод, ФД – фотодіод,  $I_{ес}$  – електричний сигнал,  $t_x^{ТЕП}$  – температура холодної поверхні ТЕП,  $t_r^{ТЕП}$  – температура гарячої поверхні ТЕП,  $I_{LD}$  – струм лазерного діода,  $I_{теп}$  – струм термоелектричного перетворювача,  $R_{тр}$  – опір терморезистора,  $t_{нс}$  – температура навколишнього середовища,  $f_{LD}$  – довжина хвилі



лазерного випромінювання,  $P_{лд}$  – потужність випромінювання лазера,  $Q_x$  – холодний потік ТЕП (холодопродуктивність),  $Q_r$  – гарячий потік ТЕП,  $O_{oc}$  – оптичний сигнал.

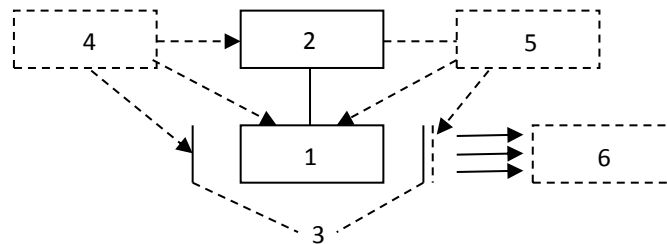
#### 4. Переліки існуючих системоутворюючих та робочих функцій САК

При практичному використанні лазерів зазвичай потрібні додаткові пристрої і системи, що забезпечують працездатність лазера або використовуються для управління випромінюванням. До них можна віднести:

- систему охолодження елементів лазера;
- систему модуляції випромінювання;
- зовнішню оптичну систему;
- пристрої для контролю параметрів випромінювання;
- пристрої для керування променем;
- пристрої для селекції типів коливань.

У кожному конкретному випадку присутність тих чи інших перерахованих елементів не є обов'язковим. Як відомо, температура активної речовини грає важливу роль в досягненні інверсії. У деяких активних речовинах інверсію можна отримати лише при їх значному охолодженні. Система охолодження призначена для забезпечення потрібної температури активної речовини або інших елементів лазера.

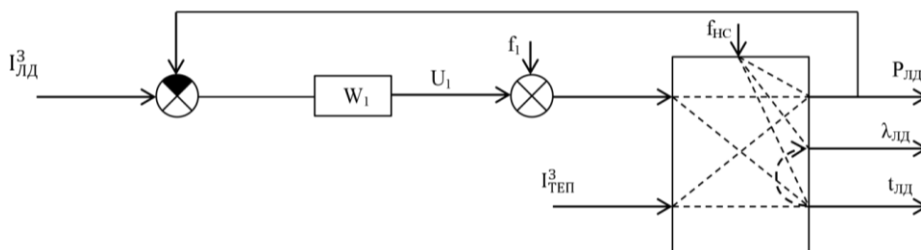
Пристрої для контролю параметрів представляють собою різні вимірювачі параметрів випромінювання та пристрої підтримки параметрів випромінювання відповідно до заданих вимог (рівень потужності, стабільність частот) [2]. На рисунку 6 [2] приведена загальна структурна схема лазерної системи, наякої суцільними лініями зображені основні елементи лазера, а пунктирними – приклади систем, які можуть застосовуватися в залежності від конкретного призначення приладу. Стрілками вказані деякі можливі зв'язки між елементами структурної схеми.



Основні системи: 1 – активне середовище; 2 – система накачування; 3 – оптичний резонатор.  
Допоміжні системи: 4 – система охолодження; 5 – система модуляції; 6 – система формування або управління профілем випромінювання лазера

Рис. 6 – Структурна схема лазера

В залежності від вимог для керування ЛД можуть використовуватись системи різного ступеня складності. Так для керування лазерними випромінювачами при формуванні оптичних сигналів за технологією оптичного мультиплексування CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) застосовується система управління тільки потужністю випромінювання, а керування довжиною хвилі відсутнє. Це пов'язано із шириною полоси каналу передачі даних, яка складає 20 нм, що дозволяє здійснювати передачу даних по 20 каналам без використання систем стабілізації довжини хвилі в передавальних пристроях та з використанням недорогих широкосмужових фільтрів при прийомі сигналів. Структурна схема такої системи керування представлена на рисунку 7.



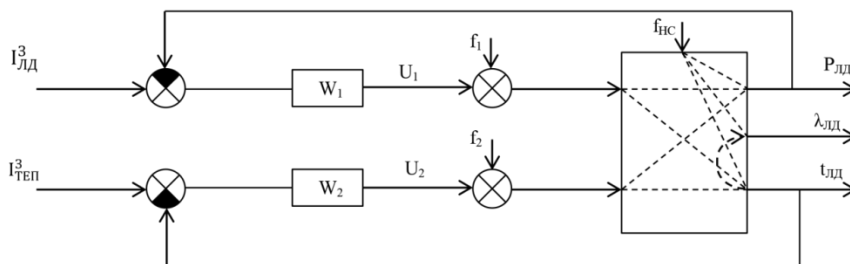
$W_1$  – регулятор,  $U_1$  – керуючий сигнал,  $f_1$  – не контрольовані збурення

Рис. 7 – Структурна схема САК формування оптичних сигналів за технологією оптичного мультиплексування CWDM

Для керування лазерними випромінювачами при формуванні оптичних сигналів за технологією оптичного мультиплексування DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) застосовуються системи керування як потужністю так і довжиною хвилі випромінювання при цьому стабілізація та пере налаштування довжини хвилі



випромінювання скісно за рахунок керування температурою ЛД без безпосереднього вимірювання довжини хвилі. Необхідність керування довжиною хвилі випромінювання пов'язана з більш жорсткими вимогами до ширини та положення центральної довжини хвилі спектру випромінювання по стандарту DWDM. Структурна схема представлена на рис. 8.

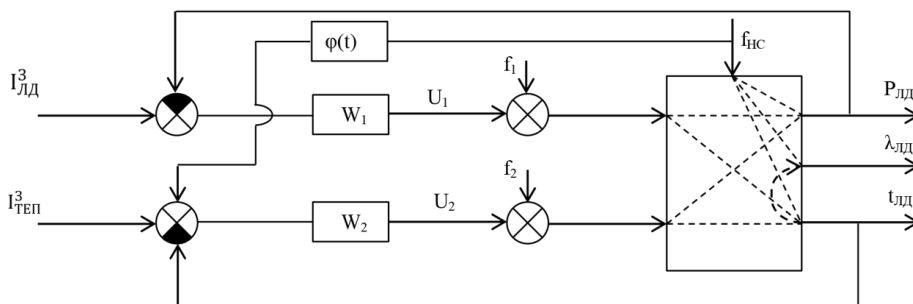


$W_1, W_2$  – регулятор,  $U_1, U_2$  – керуючий сигнал,  $f_1, f_2$  – не контрольовані збурення  
**Рис. 8 – Базова структура САК**

### 5. Обґрунтування функціональної та структурної організації перспективної САК.

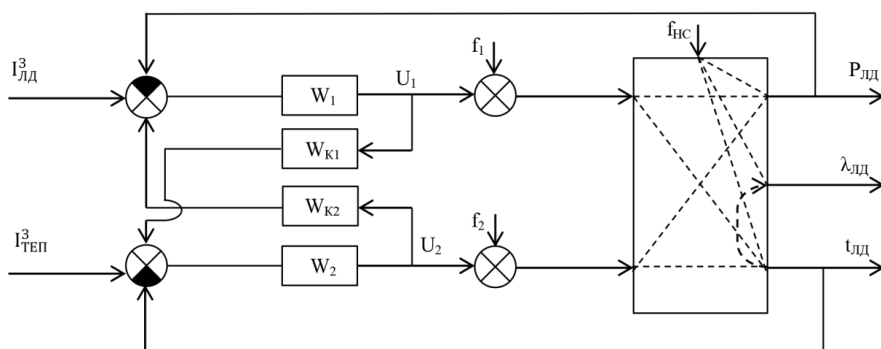
Виходячи з того, що в об'єкті керування існують значні взаємні перехресні впливи між контурами керуванням потужністю та довжиною хвилі випромінювання, а також спостерігається досить суттєвий вплив температури навколишнього середовища на контур стабілізації довжини хвилі випромінювання удосконалення системи керування можливе при її побудові на принципах інваріантності та автономності.

На рисунку 9 представлена структурна інваріантної САК до збурень по температурі навколишнього середовища. Інваріантність досягається за рахунок введення корегувального зв'язку  $\varphi(t)$  в контур стабілізації температури ЛД.



$W_1, W_2$  – регулятор,  $U_1, U_2$  – керуючий сигнал,  $f_1, f_2$  – не контрольовані збурення,  
 $\varphi(t)$  – блок компенсації збурення  
**Рис. 9 – Структурна схема інваріантної САК**

На рисунку 10 представлена структурна схема автономної САК. Автономність контурів САК досягається за рахунок введення між регуляторних корегувальних зв'язків.



$W_1, W_2$  – регулятор,  $U_1, U_2$  – керуючий сигнал,  $f_1, f_2$  – не контрольовані збурення,  
 $W_{K1}, W_{K2}$  – корегуючі ланки  
**Рис. 10 – Структурна схема автономної САК**

**Висновки:** Подальше поліпшення якості керування параметрами випромінювання лазерних діодів можливе за рахунок вдосконалення системи керування шляхом розробки алгоритмів управління які забезпечать автономність



контурів регулювання потужності та довжини хвилі випромінювання а також інваріантності їх від параметрів навколишнього середовища. Для виконання цієї задачі потрібно: дослідити процес формування когерентного електромагнітного випромінювання, як об'єкту керування, особливу увагу при цьому слід приділити дослідженню динамічних властивостей; призвести ідентифікацію з метою ідентифікації основних каналів перетворення; побудувати імітаційну модель процесу, перевірити її на адекватність та провести синтез вдосконаленої системи керування побудованої на принципах автономності, інваріантності та каскадності.

#### Список використаних джерел

- [1] Звелто О. З. 43 Принципы лазеров / Пер. под науч. ред. Т. А. Шмаонова. 4-е изд. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 720 с: ил.
- [2] Митрофанов А. С. Основные принципы работы лазеров. Учебное пособие по курсу "Лазерная физика, техника и технология". – СПб: СПбГИТМО(ТУ), 1999. – 74 с.
- [3] Коэф Й., Фишер М., Легге М., Сейферт Й., Вернер Р. Лазеры с распределенными брэгговскими решетками на квантовых ямах, точках и с квантовыми каскадами.
- [4] Жмудь В. А. Системы автоматического управления. Прецизионное управление лазерным излучением, 2018.
- [5] Дураев В.П. Источники оптического излучения. – В кн.: Волоконно-оптическая техника: История, достижения, перспективы: Сб. статей под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. – М.: Изд. Connect, 2000.
- [6] Дураев В.П. Полупроводниковые лазеры с волоконной брэгговской решеткой и узким спектром генерации на длинах волн 1530-1560 нм. – Квантовая электроника, 2001.
- [7] Ветров А. А., Данилов Д. А., Есипов С. С., Комиссаров С. С., Сергушичев А. Н. Сравнение температурных и электрических методов управления длиной волны излучения полупроводниковых лазеров. – 2009.

#### References

- [1] O. Zvelto, *43 Principles of lasers*. SPb, Izdatelstvo «Lan», 2008. 720 p.
- [2] A. S. Mitrofanov, *Basic principles of laser operation*. Textbook for the course "Laser Physics, Engineering and Technology". SPb, 1999, 74 p.
- [3] J. Coeff, M. Fischer, M. Legge, J. Seifert, R. Werner, *Lasers with distributed Bragg gratings on quantum wells, points and with quantum cascades*.
- [4] V. A. Zmud, "Automatic control systems. Precision control of laser radiation," 2018.
- [5] V. P. Duraev, "Sources of optical radiation," in *Fiber-optic technology: History, achievements, prospects*, Moscow, Connect, 2000.
- [6] V. P. Duraev, "Semiconductor lasers with a Bragg lattice fiber and a narrow lasing spectrum at wavelengths of 1530–1560 nm," *Quantum Electronics*, 2001.
- [7] A. A. Vetrov *et al.* "Comparison of temperature and electrical methods for controlling the wavelength of radiation of semiconductor lasers," 2009.

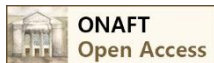
УДК 004.91:004.056.55.347.135.224

## АНАЛІЗ КОМПЛЕКСНОЇ МОДЕЛІ КРИПТОСИСТЕМИ ДЛЯ ЗАХИСТУ КОНФІДЕНЦІЙНИХ ДАНИХ В КОМП'ЮТЕРІ

Борцова Ю. В.<sup>1</sup>, Плотніков В. М.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, Україна  
ORCID: <sup>1</sup> <http://orcid.org/0000-0001-6712-8357>, <sup>2</sup> <http://orcid.org/0000-0001-9000-2568>  
E-mail: <sup>1</sup> [bortsova.07@gmail.com](mailto:bortsova.07@gmail.com)

Copyright © 2020 by author and the journal "Automation of technological and business - processes."  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i2.1808>



**Анотація.** Для захисту конфіденційних даних від комп'ютерних злочинів користувач має подбати про безпеку своєї інформації власноруч, використовуючи існуючі сучасні програмні засоби. Одним з таких засобів є реалізація шифрування повідомлень за допомогою прикріплення цифрового підпису до даних. Для роботи криптосистем шифрування з відкритим ключем необхідно три алгоритми: алгоритм шифрування, алгоритм розшифрування та алгоритм генерації ключів. Одним з перспективних шляхів розвитку шифрування з відкритими ключами є використання моделі піднесення до великої степені дискретних логарифмів для генерування ключів, так званий алгоритм Діффі – Хеллмана. Аналізується спектр можливих кібератак, специфіку їх реалізації, та напрямки дії, надаються теоретичні аспекти протоколу обміну ключами Діффі-Хеллмана, проводиться їх реалізація, тестування протоколу і порівняльний аналіз реалізації програмного продукту.

**Abstract.** For the hijacking of confidential data from computer users who want to give me some information about the safety of their own information, the vicious hand, and the vicious news program. One of these concerns is realizing encryption is more than necessary for the additional protection of digital signatures before a

tribute. For cryptosystem robots, encryption with a secure key requires three algorithms: the encryption algorithm, the encryption algorithm, and the key generation algorithm. One of the promising ways to develop encryption with advanced keys is to choose a model for a high degree of discrete logarithms for generating keys, so the Diffie-Hellman algorithm ranks. The spectrum of possible cyber attacks is analyzed, the specifics of their implementation, those are straightforward, the theoretical aspects of the protocol are exchanged with the exchange of Diffie-Hellman keys, the implementation of the protocol is tested, and the protocol is analyzed.

**Ключові слова:** криптографія, стратегія безпеки, шифрування з відкритими ключами, алгоритм Діффі-Хеллмана кібератака

**Keywords:** cryptography, security strategy, public key encryption, Diffie-Hellman algorithm, cyberattack

## Вступ

Криптографія є кращою стратегією безпеки, яка розбудовувалася протягом десятиліть, особливо після впровадження й поширення комп'ютерів. Криптографія широко відома як наука про кодування даних для запобігання несанкціонованого доступу через незахищені канали зв'язку. Шифрування підрозділяється на три категорії: симетричне шифрування, асиметричне шифрування й геш-функції. Секретний ключ і симетричне шифрування розбудовувалися першими. Симетричне шифрування використовує один секретний або особистий ключ для шифрування й дешифрування даних. Процес розшифрування прямо протилежний процесу шифрування. Проте, однієї з основних проблем є передача ключа для розшифрування через інтернет. Це основна перешкода, тому що якщо ключ буде перехоплений зловмисниками, те зашифровані дані можуть бути легко розшифровані.

Ця проблема передачі ключа для симетричного шифрування була порушена в науково-дослідному проєкті, проведеному Уїтфілдом Діффі й Мартіном Хеллманом з Масачусетського технологічного інституту в 1976 році. Алгоритм, розроблений ними, широко відомий як алгоритм Діффі - Хеллмана, який використовується для безпечного обміну секретним ключем між двома сторонами в режимі реального часу в незахищеній мережі. Загальний секретний ключ дуже важливий для двох сторін, які, можливо, не спілкувалися раніше, тому вони можуть зашифрувати свої повідомлення. По суті це протокол узгодження ключа, який підтримує таємність між двома сторонами для обміну ключами. Узгодження ключів являє собою метод, у якому пристрою передачі даних у мережі встановлюють загальний секретний ключ між ними, без обміну якими-небудь секретними даними. У цьому методі пристроям необхідно обмінятися своїми відкритими ключами. Обоє пристрою після приймання відкритих ключів виконують операцію генерації ключа з використанням свого секретного ключа, щоб одержати загальний секретний ключ. Завдяки своїм чудовим атрибутам безпеки, у наш час алгоритм широко використовується й має безліч модифікацій. Деякі дослідники змінили алгоритм Діффі - Хеллмана й використовували його в таких протоколах безпеки, як «рівень захищених сокетів» (SSL), «протокол безпеки міжмережевої взаємодії» (IPsec) і т.д.

Проте, деякі недоліки алгоритму Діффі - Хеллмана усе ще існують. Одним з недоліків алгоритму Діффі - Хеллмана є обсяг обчислень, у зв'язку із чим збільшується тимчасова складність при генерації відкритих ключів.

## 1. Завдання аутентифікації даних

Внаслідок того, що інформація має нематеріальний характер, масиви даних не несуть на собі ніяких відбитків, по яких можна було б судити про їхнє минуле – про те, хто є автором, про час створення, про факти, час і авторах внесених змін. Модифікація інформаційного масиву не залишає відчутних слідів на ньому й не може бути виявлена звичайними методами. «Сліди модифікації» у тієї або іншій формі можуть бути присутніми тільки на матеріальних носіях інформації – так, спеціальна експертиза цілком здатна встановити, що сектор X на якійсь дискеті був записаний пізніше всіх інших секторів з даними на цій же доріжці дискети, і цей запис проводився на іншому дисководі. Зазначений факт, будучи встановленим, може, наприклад, означати, що в дані, збережені на дискеті, були внесені зміни. Але після того, як ці дані будуть переписані на інший носій, їх копії вже не будуть містити ніяких слідів модифікації. Реальні комп'ютерні дані за час свого життя багаторазово міняють фізичну основу вистави й постійно кочують із носія на носій, у силу чого їх не виявлене викривлення не представляє серйозних проблем.



Оскільки створення й використання інформаційних масивів практично завжди розділені в часі й/або в просторі, у споживача завжди можуть виникнути обґрунтовані сумніви в тому, що отриманий їм масив даних створений потрібним джерелом. Таким чином, у системах обробки інформації крім забезпечення її таємності важливо гарантувати наступні властивості для кожного масиву даних:

– *дійсність* – він прийшов до споживача саме таким, яким був створений джерелом і не перетерпів на своєму життєвому шляху несанкціонованих змін;

– *авторство* – він був створений саме тем джерелом, яким припускає споживач.

Забезпечення системою обробки цих двох якостей масивів інформації й становить завдання їх аутентифікації, а відповідна здатність системи забезпечити надійну аутентифікацію даних називається її автентичністю.

На перший погляд може здатися, що дане завдання вирішується простим шифруванням. Дійсно, якщо масив даних зашифрований з використанням стійкого шифру, такого, наприклад, як ДСТУ 3396.0-96 [6], то для нього практично завжди буде справедливо наступне:

– у нього важко внести зміни осмисленим образом, оскільки зі ступенем імовірності, що незначно відрізняється від одиниці, факти модифікації зашифрованих масивів даних стають очевидними після них розшифрування – ця очевидність виражається в тому, що такі дані перестають бути коректними для їхнього інтерпретатора: замість тексту українською мовою з'являється нісенітниця, архіватори повідомляють, що цілісність архіву порушена і т.д.;

– що тільки володіють секретним ключем шифрування користувачі системи можуть виготовити зашифроване повідомлення, таким чином, якщо до одержувача приходять повідомлення, зашифроване на його секретному ключі, він може бути впевненим у його авторстві, тому що крім нього самого тільки законний відправник міг виготовити це повідомлення.

Проте, використання шифрування в системах обробки даних саме по собі незручно забезпечити їхньої автентичності по наступних причинах:

1) Зміни, внесені в зашифровані дані, стають очевидними після розшифрування тільки у випадку великої надмірності вихідних даних. Ця надмірність має місце, наприклад, якщо масив інформації є текстом на якій-небудь людській мові. Однак у загальному випадку ця вимога може не виконуватися – якщо випадкова модифікація даних не робить їхнім неприпустимим для інтерпретації зі скільки-небудь значною часткою ймовірності, то шифрування масиву не забезпечує його дійсності. Говорячи мовою криптології, автентичність і таємність суть різні властивості криптосистем. Або, більш просто: властивості систем обробки інформації забезпечувати таємність і дійсність оброблених даних у загальному випадку можуть не збігатися.

2) Факт успішного (у змісті попереднього пункту) розшифрування зашифрованих на секретному ключі даних може підтвердити їхнє авторство тільки в очах самого одержувача. Третя сторона не зможе зробити на підставі цього однозначного виводу про авторство масиву інформації, тому що його автором може бути кожний із власників секретного ключа, а їх як мінімум два – відправник і одержувач. Тому в цьому випадку спори про авторство повідомлення не можуть бути дозволені незалежним арбітражем. Це важливо для тих систем, де між учасниками немає взаємної довіри, що досить характерно для банківських систем, пов'язаних з керуванням значними цінностями.

Таким чином, існування проблеми підтвердження справжності й авторства масивів даних, окремої від завдання забезпечення їх таємності, не викликає сумніву. У наступних розділах справжньої роботи викладаються підходи до її розв'язку, що базуються на використанні класичних блокових шифрів. Для розв'язку зазначених завдань може бути використаний будь-який традиційний блоковий криптографічний алгоритм. В комп'ютерних кодах, прикладених до справжньої роботи, використовується найбільш знайомий шифр – криптоалгоритм ДСТУ 3396.0-96 [6].

## 2. Завдання імітозахисту даних

Під імітозахистом даних у системах їх обробки розуміють захист від нав'язування неправильних даних. Як ми вже з'ясували, практично завжди на деяких етапах свого життєвого циклу інформація виявляється поза зоною безпосереднього контролю над нею. Це трапляється, наприклад, при передачі даних по каналах зв'язку або при їхнім зберіганні на магнітних носіях ЕОМ, фізичний доступ до яких сторонніх осіб виключити майже ніколи не представляється можливим. Фізично запобігти внесенню несанкціонованих змін у дані в переважній більшості реальних систем їх обробки, передачі й зберігання не представляється можливим. Тому надто важливо вчасно виявити сам факт таких змін – якщо подібні випадкові або навмисні викривлення будуть вчасно виявлені, втрати користувачів системи будуть мінімальні й обмежаться лише вартістю «порожньої» передачі або зберігання неправильних даних, що, звичайно, у всіх реальних ситуаціях незмірно менше можливого збитку від їхнього використання. Метою зловмисника, що нав'язує системі неправильну інформацію, є видача її за справжню, а це можливо тільки в тому випадку, якщо сам факт такого нав'язування не буде вчасно виявлений, тому проста фіксація цього факту зводить нанівець усі зусилля зловмисника. Підіємо підсумок – під захистом даних від несанкціонованих змін у криптографії розуміють не виключення самої можливості таких змін, а набір методів, що дозволяють надійно зафіксувати їхні факти, якщо вони мали місце [2,19].

Спробуємо знайти універсальні підходи до побудови такого захисту. Насамперед, у розпорядженні одержувача інформації повинна бути процедура перевірки або аутентифікації  $A(T)$ , що дозволяє перевірити дійсність отриманого масиву даних  $T$ . На виході зазначена процедура повинна видавати одне із двох можливих булевих значень – масив даних зорієнтований як справжній, або як неправильний:  $A(T) \in \{0,1\}$  для будь-якого припустимого  $T$ . Умовимося,



що значення 1 відповідає справжньому масиву даних, а значення 0 – неправильному. Процедура аутентифікації повинна мати наступні властивості, що обмежують можливість зломисника підібрати масив даних  $T_1$ , що відрізняється від справжнього масиву  $T$  ( $T \neq T_1$ ), який би проте був би цією процедурою пізнаний як справжній ( $A(T_1) = 1$ ):

- у зломисника не повинне бути можливості знайти таке повідомлення інакше як шляхом перебору по безлічі припустимих повідомлень – остання можливість є в його розпорядженні завжди;
- ймовірність успішно пройти перевірку на дійсність у випадково обраного повідомлення  $T^*$  не повинна перевищувати заздалегідь установленого значення  $p$ .

Тепер згадаємо про універсальність створеної схеми захисту, який, зокрема, означає, що схема повинна бути придатною для захисту будь-якого масиву даних  $T$  з досить широкого класу. Однак, якщо реалізувати схему буквально, тобто використовувати для перевірки в точності те повідомлення, яке відправник повинен передати одержувачеві, принцип універсальності може прийти в протиріччя із другою вимогою до процедури перевірки. Дійсно, виходячи із цього принципу ми можемо зажадати, щоб усі можливі повідомлення  $T$  були припустимими, що зовсім явно порушить друга вимога до функції перевірки. Для того, щоб їх примирити, у схему необхідно ввести додаткові кроки – перетворення даних відправником і зворотне перетворення одержувачем. Відправник виконує перетворення даних з використанням деякого алгоритму  $F$ :  $T' = F(T)$ . Тоді, крім процедури аутентифікації, у розпорядженні одержувача повинна бути процедура  $G$  відновлення вихідних даних:  $T = G(T')$ . Увесь зміст цих перетворень полягає в тому, щоб безліч перетворених повідомлень  $\{T'\}$ , що взаємно однозначно відображається на безліч припустимих вихідних повідомлень  $\{T\}$ , було невідоме зломисникові, і ймовірність випадково вгадати елемент із цієї безлічі була досить мала для того, щоб її можна було не брати до уваги [10,12].

Остання вимога в комбінації із принципом універсальності однозначно приводить до необхідності внесення певної надмірності в повідомлення, що означає попросту той факт, що розмір перетвореного повідомлення повинен бути більше розміру вихідного повідомлення на деяку величину, саме й складову ступінь надмірності:  $|T'| - |T| = \Delta$ . Очевидно, що чим більше ця величина, тем менше ймовірність прийняти випадково взяте повідомлення за справжнє – ця ймовірність рівна  $2^{-\Delta}$ . Якби не вимога внесення надмірності, у якості функцій перетворення  $F$  і  $G$  даних могли б використовуватися функції зашифрування й розшифрування даних на деякому ключі  $K$ :  $F(T) = E_K(T)$ ,  $G(T') = D_K(T')$ . Однак при їхнім використанні розмір масиву зашифрованих даних  $T'$  дорівнює розміру масиву вихідних даних  $T$ :  $|T'| = |T|$ , тому метод тут не підходить [13].

Найбільше природно реалізувати алгоритм перетворення із внесенням надмірності простим додаванням до вихідних даних контрольної комбінації фіксованого розміру, що обчислюється як деяка функція від цих даних:  $T' = F(T) = (T, C)$ ,  $C = f(T)$ ,  $|C| = \Delta$ . У цьому випадку виділення вихідних даних з перетвореного масиву полягає в простому відкиданні доданої контрольної комбінації  $C$ :  $T = G(T') = G(T, C) = T$ . Перевірка на дійсність полягає в обчисленні для змістовної частини  $T$  отриманого масиву даних  $T'$  значення контрольної комбінації  $C' = f(T)$  і порівнянні його з переданим значенням контрольною комбінацією  $C$ . Якщо вони збігаються, повідомлення вважається справжнім, інакше – неправильним:

$$A(T') = \begin{cases} 1, C = f(T) \\ 0, C \neq f(T) \end{cases}.$$

Тепер розглянемо властивості, яким повинна задовольняти функція створення контрольної комбінації  $f$ :

1. Ця функція повинна бути обчислювально необоротною, тобто не повинне існувати способу підібрати масив даних  $T$  під задану контрольну комбінацію  $C$  інакше як перебором по просторі можливих значень  $T$ .

2. Ця функція не повинна бути відома зломисникові – у нього не повинне бути способу обчислити контрольну комбінацію  $C$  ні для якого масиву даних  $T$ . Ця вимога по суті означає, що функція  $f$  повинна бути секретною, розглянемо його докладніше:

– по-перше, відповідно до загальновіданого в криптографії принципу Кірхгофа вимога таємності функції створення контрольної комбінації слід замінити на застосування відкритої функції, що використовує вектор секретних параметрів (ключ) – точно так само, як це робиться при побудові шифрів:  $C = f(T) = f_k(T)$ .

– по-друге, виявляється, що в окремих випадках ця вимога можна істотно послабити. Справа в тому, що дійсна мета цього пункту – виключити для зломисника можливість відправити неправильне повідомлення  $T_1$ , постачивши його коректно обчисленою контрольною комбінацією  $C_1 = f(T_1)$ . Цього можна досягнути двома такими способами:

- a) за допомогою використаного вище вимоги таємності функції обчислення контрольної комбінації або залежності її від вектора секретних параметрів (ключа);
- b) за допомогою організації такого протоколу використання засобів захисту, який би виключав можливість подібного нав'язування неправильних даних.

Очевидно, що можливість (b) може бути реалізована тільки якщо контрольна комбінація передається або зберігається окремо від даних, що захищаються. Незважаючи на гадану екзотичність, така можливість зустрічається досить часто, мова про неї спереду [1-5].

Розглянемо деякі добре відомі способи обчислення контрольної комбінації й оцінимо можливість їх використання в розглянутій системі імітозахисту даних.



Найпростішим прикладом такої комбінації є контрольна сума блоків повідомлення, узятя по модулю деякого числа, звичайно беруть два в ступені розміру блоку:

$$\text{якщо } T = (T_1, T_2, \dots, T_m), \text{ тоді} \\ C = f(T) = (T_1 + T_2 + \dots + T_m) \bmod 2^N,$$

де  $N = |T_1| = |T_2| = \dots = |T_m|$  – розмір блоків повідомлення.

Однак таке перетворення не відповідає обом вищевикладеним вимогам до функції обчислення контрольної комбінації й тому непридатне для використання в схемі імітозахисту:

- По-перше, і це найголовніше – воно не виключає можливість добору даних під задану контрольну комбінацію. Дійсно, нехай відправник інформації передав по ненадійному каналу повідомлення  $T$  і контрольну суму  $C$  для нього, обчислену по наведеній вище формулі. У цьому випадку все, що буде потрібно зловмисникові для нав'язування одержувачеві довільно взятого неправильного масиву даних  $T' = (T'_1, T'_2, \dots, T'_m)$  – це доповнити його ще одним блоком, обчисленим по наступній формулі:

$$T'_{m+1} = C - (T'_1 + T'_2 + \dots + T'_m) \bmod 2^N.$$

Усі блоки неправильного повідомлення, крім одного, не обов'язково останнього, зловмисник може встановити довільними.

- По-друге, розглянуте перетворення не є криптографічним, і для зловмисника не важко буде виготовити контрольну комбінацію для довільного обраного їм повідомлення, що дозволяє йому успішно видати його за справжнє – якщо контрольна комбінація зберігається або передається разом з масивом, що захищається, даних.

У цей час відомі два підходи до розв'язку завдання захисту даних від несанкціонованої зміни, що базуються на дві викладені вище підходах до створення контрольної комбінації:

1. Створення MAC – *Message Authentication Code* – коду аутентифікації повідомлень. Цей підхід полягає в тому, що контрольна комбінація обчислюється з використанням секретного ключа за допомогою деякого блокового шифру. Важливо, що на основі будь-якого такого шифру можна створити алгоритм обчислення MAC для масивів даних довільного розміру. У літературі MAC іноді не цілком коректно називається криптографічною контрольною сумою, або, що більш точно, криптографічною контрольною комбінацією. Даний підхід до аутентифікації даних загальновизначений і закріплений практично у всіх криптографічних стандартах – імітовставка, формована відповідно до ДСТУ 3396.0–96 є типовим зразком MAC.

2. Створення MDC – *Manipulation Detection Code* – коду виявлення маніпуляцій (з даними). Для обчислення MDC для блоку даних використовується так звана необоротна функція стиску інформації, у літературі також називана односторонньою функцією, функцією одностороннього стиску (перетворення) інформації, криптографічною геш-функцією, або просто геш-функцією. Зрозуміло, що її необоротність повинна носити обчислювальний характер:

- обчислення прямої функції  $Y = f(X)$  легко здійсненне обчислювально;
- обчислення зворотної функції  $X = f^{-1}(Y)$  нездійсненне обчислювально, тобто не може бути виконане більш ефективним шляхом, чому перебором по безлічі можливих значень  $X$ .

Обидва способи обчислення контрольної комбінації – MDC і MAC – обирають у якості аргументу блок даних довільного розміру й видають у якості результату блок даних фіксованого розміру [18,19].

Прокоментуємо відмінності: підхід на основі MAC вимагає для обчислення контрольної комбінації секретного ключа, для другого це не потрібно. Потенційний зловмисник не зможе обчислити MAC для довільного сфабрикованого їм повідомлення, але зможе обчислити MDC, тому що для цього не потрібно ніяких секретних даних, тому MAC може передаватися від джерела до приймача по відкритому каналу, тоді як для передачі MDC потрібен захищений канал.

Вдалося б, переваги першого підходу настільки очевидні, що другий підхід не зможе знайти собі застосування. Однак це не так – використання MAC вимагає, щоб попередньо між учасниками інформаційного обміну були розподілені ключі. Якщо ж цього не відбулося, для його реалізації необхідний спеціальний канал, що забезпечує *таємність* і *дійсність* переданої інформації, по якому паралельно з передачею даних по незахищеному каналу будуть передаватися ключі. Для передачі ж MDC потрібен канал, що забезпечує тільки *дійсність* переданих даних, вимога таємності відсутня, і це робить даний метод кращим при одноразовій передачі даних: основна інформація передається по звичайному незахищеному каналу, а MDC повідомляється відправником одержувачеві по каналу, який може прослуховуватися але не може бути використаний для нав'язування неправильних даних – наприклад, голосом по телефону – якщо учасники обміну особисто знайомі й добре знають голоси один одного [11].

У таблиці 1 наведені порівняльні характеристики обох підходів.

Крім того, підхід на основі створення MDC більш простий і зручний для систем, де створення й використання інформаційних масивів розділені в часі, але не в просторі, тобто для контролю цілісності *збереженої*, а не *переданої* інформації – наприклад, для контролю незмінності програм і даних у комп'ютерних системах. При цьому контрольна комбінація (MDC) повинна зберігатися в системі таким чином, щоб виключити можливість її модифікації зловмисником.

Обоє підходу допускають можливість реалізації на основі будь-якого класичного блокового шифру. При цьому надійність отриманої системи імітозахисту, звичайно за умови її коректної реалізації, буде визначатися стійкістю використаного блокового шифру – це твердження виняткове легко доводиться. У двох наступних розділах будуть розглянуто обоє підходу до контролю незмінності масивів даних



Таблиця 1 – Порівняльні характеристики підходів до розв'язку завдання контролю незмінності масивів даних

№	Параметр порівняння	Підхід	
		обчислення MAC	обчислення MDC
1.	Використовуване перетворення даних	Криптографічне перетворення (функція зашифрування)	Однобічна функція, функція необоротного стиску інформації
2.	Використовувана секретна інформація	Секретний ключ	Не використовується
3.	Можливість для третьої сторони обчислити контрольну комбінацію	Зловмисник не може обчислити контрольну комбінацію, якщо йому не відомий секретний ключ	Зловмисник може обчислити контрольну комбінацію для довільного блоку даних
4.	Зберігання й передача контрольної комбінації	Контрольна комбінація може зберігатися й передаватися разом з масивом, що захищається, даних	Контрольна комбінація повинна зберігатися й передаватися окремо від масиву, що захищається, даних
5.	Додаткові умови	Вимагає попереднього розподілу ключів між учасниками інформаційного обміну	Не вимагає попередніх дій
6.	Області, у яких підхід має перевага	Захист від несанкціонованих змін даних при їхній передачі	Разова передача масивів даних, контроль незмінності файлів даних і програм

### Створення коду аутентифікації повідомлень

Створення коду аутентифікації повідомлень із використанням процедури криптографічного перетворення даних офіційно або напівофіційно закріплена в багатьох стандартах на алгоритми шифрування. Так, наприклад, у різних коментарях до стандарту шифрування США рекомендується використовувати DES для створення контрольної комбінації [5]. Український стандарт шифрування ДСТУ 3396.0–96 [6] явно передбачає режим створення імітовставки, яка є не чому іншим, як зразком MAC.

Схема використання криптографічного перетворення  $E_K$  для створення коду аутентифікації досить проста: усе вихідне повідомлення розбивається на блоки, потім послідовно для кожного блоку перебуває результат перетворення по алгоритму  $E_K$  побітової суми блоку по модулю 2 з результатом виконання попереднього кроку. Таким чином, одержуємо наступне рівняння для створення контрольної комбінації:

$$C = C_K(T) = E_K(T_1 \oplus E_K(T_2 \oplus E_K(\dots \oplus E_K(T_m))))).$$

Схема алгоритму створення MAC наведено на рисунку 1.

– Вхідні дані – масив даних  $T$ , розбитий на  $m$  блоків фіксованого розміру, рівного розміру блоку даних використаного шифру (для більшості найбільш відомих шифрів – 64 біта):  $T = (T_1, T_2, \dots, T_m)$ . Останній блок даних  $T_m$  яким-небудь способом доповнюється до повного блоку даних, якщо має менший розмір.

– MAC одержує нульове початкове значення.

Наступний крок алгоритму 2 виконуються послідовного для кожного блоку вихідних даних у порядку їх проходження.

– Побітова сума по модулю 2 чергового блоку вихідних даних  $T_i$  з поточним значенням MAC  $S$  зазнає перетворенню по алгоритму зашифрування, результат стає новим поточним значенням MAC.

– Результатом роботи алгоритму – MAC для вхідного масиву даних – є останнє поточне значення MAC, отримане на кроці 2.

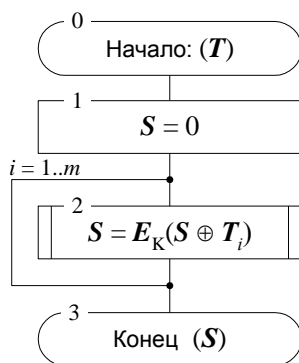


Рис. 1 – Алгоритм створення коду аутентифікації для масиву даних

Розглянемо властивості криптографічних перетворень  $E_K$ , використовуваних для шифрування даних, і визначимо ті з них, які необхідні при створення MAC:

1. Перетворення даних повинне використовувати в якості параметра секретний ключ  $K$ . Його таємність визначає таємність зашифрованих даних.

2. Перетворення даних повинне бути криптографічне стійким, тобто не повинне існувати іншої можливості визначити вхідний блок алгоритму при відомому вихідному й невідомому ключі, або визначити ключ при відомих вхідному й вихідному блоках інакше як перебором за можливими значеннями вхідного блоку й ключа в першому й у другому випадках відповідно.

3. Перетворення даних повинне бути оборотним – для того, щоб була здійснена процедура розшифрування.

Якщо перетворення, що шифрує  $E_K$  передбачається використовувати для створення коду аутентифікації, виконання третьої властивості не потрібно, тому що при цьому перетворення завжди виконується в одну сторону. Крім того криптостійкість алгоритму перетворення може бути трохи нижче, чим при шифруванні, і це не приведе до зниження надійності всієї схеми. Дійсно,



при створення MAC у розпорядженні криптоаналітика є тільки один блок даних – MAC, який є функцією відразу всіх блоків вихідного тексту, а при зашифруванні в його розпорядженні є набір блоків шифротексту, кожний з яких залежить тільки від одного блоку вихідного тексту. Очевидно, у першому випадку його завдання суттєво складніше. Саме із цієї причини в ДСТУ 3396.0–96 для створення імітовставки використовується спрощений 16–раундовий цикл перетворення, тоді як для шифрування – повний 32–раундовий.

### Створення коду виявлення маніпуляцій

Підхід до створення контрольної комбінації масиву даних за допомогою обчислювально необоротних функцій одержав розвиток тільки останнім часом у зв'язку з появою практичних схем цифровому підпису, тому що по своїй суті він є способом обчислення геш–функції, яка використовується у всіх схемах цифрового підпису [9].

Існує велика кількість можливих підходів до побудови обчислювально необоротних функцій, практично завжди самим важким є обґрунтування властивості необоротності запропонованої функції. Однак є клас способів, де така властивість не має потреби в доказі, воно просто випливає з характеристик застосованого методу – це побудова функцій одностороннього перетворення на основі класичних блокових шифрів. Даний підхід відомий досить давно й викладений у ряді робіт, з українськомовних відзначимо [7-12], у його основі лежить той факт, що рівняння зашифрування блоку даних по циклу простої заміни  $Y = EK(X)$  обчислювально нерозв'язне щодо ключа  $K$  – це є невід'ємною властивістю будь–якого дійсно стійкого шифру. Навіть при відомих відкритому ( $X$ ) і зашифрованому ( $Y$ ) блоках ключ  $K$  не може бути визначений інакше як перебором по безлічі можливих значень. Алгоритм створення контрольної комбінації для масиву даних  $T$  наступний:

- масив даних  $T$  розбивається на блоки фіксованого розміру, рівного розміру ключа використовуваного шифру:

$$T = (T_1, T_2, \dots, T_m);$$

$$|T_1| = |T_2| = \dots = |T_{m-1}| = |K|, \quad 0 < |T_m| \leq |K|.$$

- при необхідності останній (неповний) блок доповнюється яким–небудь образом до блоку повного розміру;
- MDC або геш – повідомлення обчислюється по наступній формулі:

$$C = H(T) = E_{T_m}(E_{T_{m-1}}(\dots E_{T_1}(S))),$$

де  $S$  – початкове заповнення алгоритму – може вибиратися довільно, звичайно вважають, що  $S = 0$ .

Нескладно довести, що завдання добору масиву даних  $T' = (T'_1, T'_2, \dots, T'_m)$  під задану контрольну комбінацію  $C$  еквівалентна наступній системі рівнянь добору ключа для заданих вхідного й вихідного блоків даних криптоалгоритма:

$$E_{T'_1}(S) = S_1,$$

$$E_{T'_2}(S_1) = S_2,$$

...

$$E_{T'_m}(S_{m-1}) = C.$$

Немає необхідності вирішувати відразу всі ці рівняння щодо ключа  $T'_i$  – усі блоки масиву даних  $T'$ , крім одного, можуть бути обрані довільними – це визначить, усі значення  $S_i$ , і лише один, будь–який з них, повинен бути визначений розв'язком відповідного рівняння  $E_{T'_i}(S_{i-1}) = S_i$  відносно  $T'_i$ . Тому що дане завдання обчислювально нерозв'язне в силу використання криптостійкого алгоритму шифрування, запропонована схема обчислення MDC має гарантовану стійкість, рівної стійкості використовуваного шифру [15,19].

Однак дана схема не враховує проблему побічних ключів шифру, яка полягає в наступному: може існувати кілька ключів, з використанням яких при зашифруванні однакові блоки відкритого тексту переводяться в однакові блоки шифротексту:

$$E_{K_1}(X) = E_{K_2}(X)$$

при деяких  $X$  і  $K_1 \neq K_2$ .

Один із цих ключів – той, на якому проводилося зашифрування – «дійсний», а інший – «побічний». Таким чином, побічним ключем для деякого блоку даних  $X$  і деякого дійсного ключа  $K$  називається ключ  $K'$ , який дає точно такий же результат зашифрування блоку  $X$ , що й дійсний ключ  $K$ :  $E_{K'}(X) = E_K(X)$ . Ясно, що для різних блоків вихідного масиву даних побічні ключі також у загальному випадку різні – імовірність зустріти пари ключів, що переводять одночасно трохи пара однакових блоків відкритих текстів у пари однакових блоків шифротекстів стрімко убуває з ростом числа цих пар. Тому виявлення побічного ключа криптоаналітиком при дешифруванні повідомлення не є його особливим успіхом, тому що з імовірністю, що незначно відрізняється від 1, на цьому знайденому ключі він не зможе правильно розшифрувати ніяких інших блоків шифротексту. Зовсім інша справа в алгоритмі створення MDC – тут виявлення побічного ключа означає, що зловмисник підібрав такий неправильний, тобто відсутній у повідомленні блок даних, використання якого приводить до дійсного MDC вихідного масиву даних.

Для того, щоб зменшити ймовірність нав'язування неправильних даних через знаходження побічних ключів, у кроках криптографічного перетворення застосовуються не самі блоки вихідного повідомлення, а результат їх розширення за деякою схемою. Під схемою розширення тут розуміється процедура побудови блоків даних більшого розміру із блоків даних меншого розміру. Прикладом може служити, наприклад, функція розширення, у якій вихідний блок будується з байтів (або 2–,4–,.... і т.д. –байтових слів) вихідного блоку, що перелічуються в різному



порядку. Зазначене розширення варто застосовувати, якщо розмір ключа використаного шифру в кілька раз перевищує розмір його блоку даних. Так, для алгоритму DES, з розміром блоку даних 64 біта й ключа 56 біт у розширенні немає необхідності. Якщо в схемі використовується алгоритм [1] з розміром блоку 64 біта й розміром ключа 256 біт, варто використовувати 64– або 128–бітні блоки вихідного тексту й розширювати їх до розмірів 256 біт. Приклад функції розширення 128–бітового блоку в 256–бітовий може бути, наприклад, що впливають:

Вихідний блок:

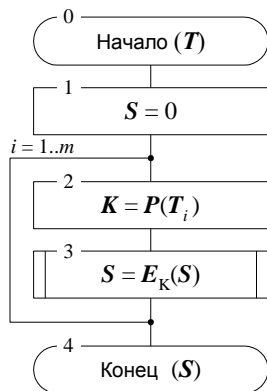
$$T = (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, B_8, B_9, B_{10}, B_{11}, B_{12}, B_{13}, B_{14}, B_{15}, B_{16}),$$

Після розширення:

$$P(T) = (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, B_8, B_9, B_{10}, B_{11}, B_{12}, B_{13}, B_{14}, B_{15}, B_{16}, B_1, B_4, B_7, B_{10}, B_{13}, B_{16}, B_3, B_6, B_9, B_{12}, B_{15}, B_2, B_5, B_8, B_{11}, B_{14}),$$

де  $B_i$  – байти блоку даних,  $|B_i| = 8$ .

Схема алгоритму створення геш–коду з використанням класичного блокового шифру наведено на рис. 2 [1–4].



**Рис. 2 – Алгоритм створення коду виявлення маніпуляцій для масиву даних**

Вхідні дані – масив даних  $T$ , розбитий на  $m$  блоків фіксованого розміру, що не перевищує розмір ключа використаного криптоалгоритма й, як правило, що ділить його націло:  $T = (T_1, T_2, \dots, T_m)$ . Останній блок даних  $T_m$  яким–небудь способом доповнюється до повного блоку даних, якщо має менший розмір.

MDC одержує нульове початкове значення (це значення може бути, у принципі, кожним).

Наступні кроки 2 і 3 алгоритму виконуються послідовно для кожного блоку вихідних даних у порядку їх проходження.

Виконується розширення чергового блоку  $T_i$  даних за допомогою функції розширення  $P$  до розміру ключа шифру.

Виконується зашифрування поточного значення MDC на ключі, отриманому на кроці 2, результат стає новим поточним значенням MDC.

Результатом роботи алгоритму (тобто MDC для всього вхідного масиву даних) є останнє поточне значення MDC, отримане на кроці 3.

Розглянутий алгоритм також може бути використаний для створення геш–коду в схемах цифрового підпису.

## Висновки

Незважаючи на велику кількість методик захисту, програмних рішень та шифрів, на сьогодні не існує надійної системи для комплексного захисту мережі підприємства. Практично будь-яку сучасну систему захисту можна обійти, та будь-який шифр можна зламати. Для цього необхідний лише час та відповідні необхідні ресурси.

Для зламу того чи іншого шифру необхідна різна кількість часу та ті чи інші допоміжні дані, чи то шифротекст, чи то відомості про роботи алгоритму шифрування, або його вхідні параметри. Кожен алгоритм має одну із основних своїх характеристик, яка має назву криптографічна стійкість. Криптографічна стійкість – це властивість алгоритму протидіяти криптографічному аналізу. На сьогоднішній день розрізняються два види систем за криптографічною стійкістю – це абсолютно стійкі та достатньо стійкі системи. Оскільки абсолютно стійкі системи дуже важко реалізувати, тому на практиці їх не використовують. Натомість використовуються достатньо стійкі системи, стійкість яких залежить виключно від того, які можливості у зловмисника. Чим більшими та потужнішими можливостями володіє зловмисник, тим легше йому вдається зламати той чи інший шифр.

Окрім, власне, криптографічних характеристик алгоритму як таких, можуть бути специфічні проблемні ділянки, якими дуже часто користуються зловмисники. До таких ділянок можна віднести слабкі ключі для симетричних алгоритмів, або ж S-блоки, які значно знижують криптографічну стійкість алгоритму. Знаючи про такі проблемні місця зловмисники можуть будувати на їх основі різні види атак.

Як ми бачимо добитися абсолютно стійкого алгоритму шифрування на практиці дуже важко, а криптографічні алгоритми з достатньою стійкістю не дають достатнього захисту для того, щоб необхідні дані залишилися в секреті.

Тому тематика даної роботи є досить актуальною на сьогоднішній день. На сьогодні постійно і безупинно ведуться кібератаки напади на основні світові компанії, на основні комунікаційні центри та канали зв'язку. На фоні цього постійно ведеться пошук нових алгоритмів шифрування та методів захисту інформації, Також постійно вдосконалюються відомі алгоритми шифрування від тих чи інших видів атак, підвищується загальна криптографічна стійкість алгоритму.

## Список використаних джерел

- [1] Брюс Шнайер. Прикладная криптография. – 2-е изд. – М.: Триумф, 2012. – 816 с.
- [2] Schneider Electric. Защита систем от кибератак.– Выпуск №36. – 2011.–277с.
- [3] Молдовян Н. А. Практикум по криптографии с открытым ключом. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 304 с.: ил.
- [4] Н. Смарт. Криптография. – Москва: Техносфера, 2005 – 528 с.
- [5] Н. Коблиц. Курс теории чисел и криптографии. – М: Науч. изд-во ТВП, 2011. – 254 с.



- [6] ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ. Захист інформації. Технічний захист інформації. Основні положення. ДСТУ 3396.0–96.
- [7] ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ 3396.2–97 . Захист інформації, технічний захист інформації, терміни та визначення.
- [8] Закон України “Про електронні документи та електронний документообіг” від 22.05. 2003 р. №851–IV.
- [9] Закон України “Про електронний підпис” від 22.05. 2003 р. № 852–IV.
- [10] Антонюк А.О. Основи захисту інформації в автоматизованих системах/ А.О. Антонюк. – К.: КМ Академія, 2006. – 244 с.
- [11] Вербіцький О.В. Вступ до криптології/ О. В. Вербіцький. – Львів: Вид-во НТЛ, 2008. – 248 с.
- [12] Герасименко В. А. Основы защиты информации/ В. А. Герасименко. – М.: Инкомбук, 1997. – 537 с.
- [13] Домарев В. В. Безопасность информационных технологий. Методы создания систем защиты/ В. Домарев. – К.: ТИД ДС, 2001. – 688 с.
- [14] Закон України «Про інформацію». – К.: Відомості Верховної Ради України, 1992. – N 48. – Ст.650 .
- [15] Медведовский И.Д. Атака на Internet/ И.Д. Медведовский, П.В., Семьянов, Д. Г. Леонов. – М.: ДМК, 1999. – 336 с.
- [16] W. Diffie, M.E.Hellman. New Directions in cryptography// IEEE Trans. Inform. Theory, IT-22, vol 6 (Nov. 1976), pp. 644-654.
- [17] У. Диффи. Первые десять лет криптографии с открытым ключом /пер. с англ./ М., Мир, ТИИЭР.–1988.–т.76.–N5.
- [18] Касперски К. Атака на Windows NT. // LAN / Журнал сетевых решений. 2015, декабрь, С. 88 - 95.

### References

- [1] B. Schneier. *Prikladnaia kriptografiya*. 2-nd ed. Moscow, Triumph, 2012, 816 p.
- [2] Schneider Electric. *Zashchita sistemy ot kiberatak*, no. 36, 2011, 277 p.
- [3] N. A. Moldovyan, “Workshop on public key cryptosystems,” SPb. BHV-Petersburg, 2007, 304 p.
- [4] N. Smart, *Cryptography*, Moscow, 2005, 528 p.
- [5] Koblitz N. *The course of number theory and cryptography*. Moscow, 2011, 254 p.
- [6] Derzhavnyi standart Ukrainy. zahist informatsiyi. Tehnichniy zahist informatsiyi. Osnovni polozhennya. DSTU 3396.0–96.
- [7] Derzhavnyi standart Ukrainy. Zahist informatsiyi 3396.2–97 . Zahist informatsiyi, tehnichniy zahist informatsiyi, termini ta viznachennya.
- [8] Zakon Ukrainy “Pro elektronni dokumenti ta elektronniy dokumentoobig” 22 May, 2003, no. 851–IV.
- [9] Zakon Ukrainy “Pro elektronniy pidpis” , 22 May, 2003, no. 852–IV.
- [10] A.O. Antoniuk, “Osnovi zahistu Informatsiyi v avtomatizovanih sistemah,” Kyiv, KM AkademIya, 2006, 244 p.
- [11] O.V. Verbitskiy, “Vstup do kriptologiyi,” LvIv, NTL, 2008, 248 p.
- [12] V. A. Gerasimenko, “Osnovni zaschityi informatsii,” Moscow, Inkombuk, 1997, 537 p.
- [13] V. V. Domarev, “Bezopasnost informatsionnyih tehnologiy. Metodyi sozdaniya sistem zaschityi,” Kyiv, TID DS, 2001, 688 p.
- [14] Zakon Ukrainy “Pro InformatsIyu,” Kyiv, vidomosti Verhovnoyi Rady Ukrainy, 1992, no. 48, 650 p.
- [15] I. D. Medvedovskiy, P.V., Semyanov, D. G. Leonov “Ataka na Internet,” Moscow, DMK, 1999, 336 p.
- [16] W. Diffie, M.E.Hellman. New Directions in cryptography// IEEE Trans. Inform. Theory, IT-22, vol 6 (Nov. 1976), pp. 644-654.
- [17] W. Diffie. First 10 years of cryptography with open key. Trans. eng., Moscow, Mir, 1988, vol.76, no.5.
- [18] K. Kasperski. Ataka na Windows NT. LAN. Zhurnal setevykh reshenii, Dec. 2015, pp. 88-95.

УДК 681.5.033.3

## ПРИКЛАДИ АНАЛІЗУ СТАЛИХ ПРОЦЕСІВ В САР ЗАСОБАМИ МАТЛАВ

Левінський М.В.<sup>1</sup>, Левінський В.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна

<sup>2</sup> Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса, Україна

ORCID: <sup>1</sup> 0000-0002-6544-5110, <sup>2</sup> 0000-0002-3563-528X

E-mail: <sup>1</sup> MaxLevinskyi@gmail.com, <sup>2</sup> ValeryLevinskyi@gmail.com

Copyright © 2020 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i2.1810>



**Анотація.** Актуальність. Ідентифікація каналу контрольованих збурень залишається актуальною задачею при побудові САР, які забезпечують високу динамічну точність стабілізації регульованої змінної. Ця задача потребує крім знань з теорії випадкових процесів також і навиків застосування сучасних пакетів програм MATLAB, що забезпечують аналіз і синтез систем керування.

**Мета.** Навести приклади застосування пакетів Signal Processing Toolbox та System Identification Toolbox в навчальній задачі ідентифікації динамічних властивостей каналу контрольованих збурень тестового об'єкту керування та виявити вплив на точність визначення параметрів моделі діапазону їх змін, а також інтенсивності та спектрального складу неконтрольованих збурень.

**Метод.** В якості методу дослідження обрано моделювання тестового об'єкту керування в середовищі Simulink.

**Результати.** Наведено експериментальні дані, які характеризують вплив на точність ідентифікації параметрів тестового об'єкту керування зміни його часу запізнення, а також спектрального складу неконтрольованих збурень.

**Висновки.** При відсутності неконтрольованих збурень зміна часу запізнення тестового об'єкту керування не суттєво впливає на точність ідентифікації параметрів його моделі. Ця точність в більшій мірі залежить від інтенсивності неконтрольованих збурень, ніж від їх спектрального складу. В цілому пакети програм Signal Processing Toolbox та System Identification Toolbox можуть бути рекомендовані для підготовки спеціалістів з автоматизації виробничих процесів в отриманні навичок з аналізу сталих процесів в САР.

**Abstract.** Topicality. Controlled disturbances channel identification remains topical problem when building ACS which provide high dynamic accuracy of controlled variable stabilization. This task requires knowledge of stochastic processes theory as well as utilization of MATLAB modern program packages, which provide analysis and synthesis of control systems.

**Goal.** To provide examples of using such packages as Signal Processing Toolbox and System Identification Toolbox in the task of test control object's controlled disturbances channel's dynamic characteristics identification and establish an influence on accuracy of model parameters estimation and range of their change and also intensity and spectral composition of non-controllable disturbances.

**Means.** Test control object modelling in Simulink environment was chosen as means of research.

**Results.** Experimental data is provided which characterize the control object delay time change influence on its parameters identification accuracy as well as influence of varying spectral composition of non-controllable disturbances.

**Conclusions.** If non-controllable disturbances are absent, test control object delay time change does not significantly affect the accuracy of identification of its model parameters. This accuracy depends more on the intensity of non-controllable disturbances than on its spectral composition. In general, software packages Signal Processing Toolbox and System Identification Toolbox can be recommended for training of specialists in automatic control for acquisition of skills in steady state processes analysis.

**Ключові слова:** пакети програм MATLAB, канал контрольованих збурень, ідентифікація параметрів.

**Keywords:** MATLAB software packages, controlled perturbation channel, parameter identification.

## 1. Вступ

Велика кількість незалежних одне від одного зовнішніх збурень, що діють на об'єкт керування (ОК), проявляється в системі автоматичного регулювання (САР) у вигляді випадкових змін регульованої змінної. Тому при складанні моделей ОК та оцінці якості регулювання ці зміни часто представляють у вигляді квазістаціонарного випадкового процесу, для якого необхідно визначити структуру і параметри його імовірнісних характеристик. Ця задача характерна для сталих режимів функціонування САР.

У випадку, коли в системі можна виділити контрольоване збурення  $f_k(t)$ , яке суттєво впливає на регульовану змінну  $y(t)$ , доцільно визначити динамічні властивості цього каналу ОК, що дозволить обчислити модель коригуючого зв'язку  $W^c(s)$  та в результаті покращити якість регулювання. Фактично виникає задача ідентифікації передатної функції

$W_{f_k y}^o(s)$  (див. рис. 1).

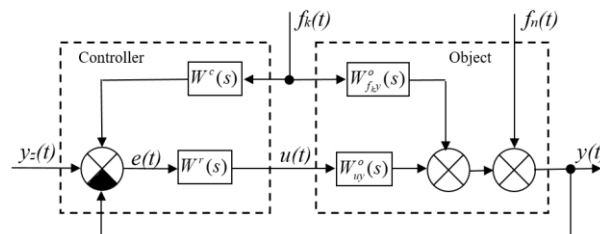


Рис. 1. Структурна схема САР

На відміну від керуючої дії  $u(t)$ , цілеспрямовано змінити  $f_k(t)$  часто неможливо, тому модель  $W_{f_k y}^o(s)$  визначають на основі даних пасивного експерименту [1, 2]. Очевидно, що адекватність цієї моделі буде залежати від інтенсивності та спектрального складу неконтрольованих збурень  $f_n(t)$ . Сам експеримент проводять при розімкнутому зворотному зв'язку в САР, аби уникнути впливу її власного руху на регульовану змінну  $y(t)$ .



## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Для аналізу і обробки змінних в САР доцільно використовувати алгоритми пакету інструментів Signal Processing Toolbox середовища MATLAB [3, 4]. За допомогою пакету можна візуалізувати сигнали в часовій і частотній області, проектувати фільтри, виконувати згортку, модуляцію і інші методи обробки сигналів. Ключовим для розуміння характеристик сигналу є аналіз його спектру. Пакет надає функції для оцінки спектральної щільності потужності, середньоквадратичного спектра, псевдоспектра і середньої потужності сигналів.

Пакет Матлаб System Identification Toolbox орієнтований на вирішення завдань ідентифікації в САР. За допомогою пакета по часовим або частотним вхідним і вихідним експериментальним даним можна оперативнo ідентифікувати безперервні і дискретні передатні функції, описувати поведінку динамічних систем в просторі станів, визначати структуру і порядок моделі, виконувати оцінку її параметрів та перевіряти достовірність [5].

Даний пакет працює з моделями процесів у вигляді передатних функцій  $W(s) = K \exp(-\tau s)/(1+Ts)$ ,  $W(s) = K(1+T_1s)/(1+T_2s)$ ,  $W(s) = K/s(1+Ts)$ , зі спектральними та кореляційними моделями, а також з нелінійними моделями.

На жаль, недостатня кількість прикладів використання вказаних пакетів стримують їх впровадження як в учбових, так і в промислових задачах.

## 3. Мета і завдання дослідження:

навести приклади застосування пакетів Signal Processing Toolbox та System Identification Toolbox в учбовій задачі ідентифікації динамічних властивостей каналу контрольованих збурень тестового об'єкту керування та виявити вплив на точність визначення параметрів моделі діапазону їх змін, а також інтенсивності та спектрального складу неконтрольованих збурень.

## 4. Методи і матеріали досліджень

4.1 В якості методу дослідження обрано моделювання тестового ОК в середовищі Simulink [6]. Передатна функція каналу  $f_k(t) - y(t)$   $W_{fk,y}^o(s) = K_o \exp(\tau_o s)/(T_o s + 1)^2$ , контрольовані і неконтрольовані збурення сформовані від генератора псевдобілого шуму формуючими фільтрами з передатними функціями  $W_{fk}(s) = 1/(T_{fk}s + 1)^2$  та  $W_{fn}(s) = 1/(T_{fn}s + 1)^2$  (див. рис. 2). Змінні  $f_k(t)$ ,  $y(t)$  за результатами моделювання передавались в роботу область MATLAB.

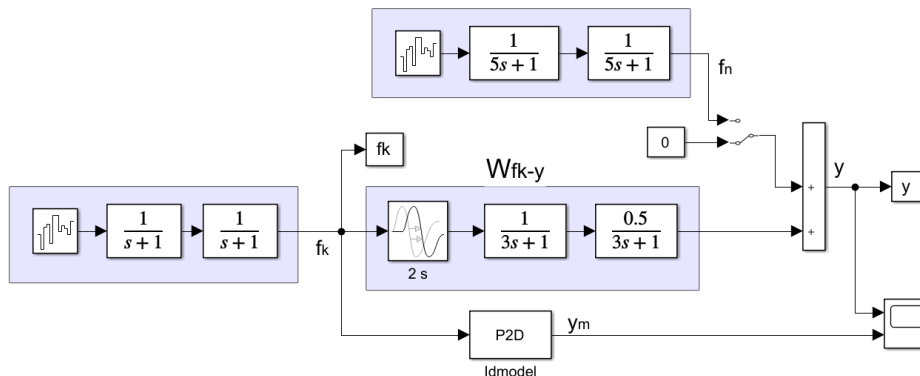


Рис. 2 Схема моделювання тестового ОК в Simulink

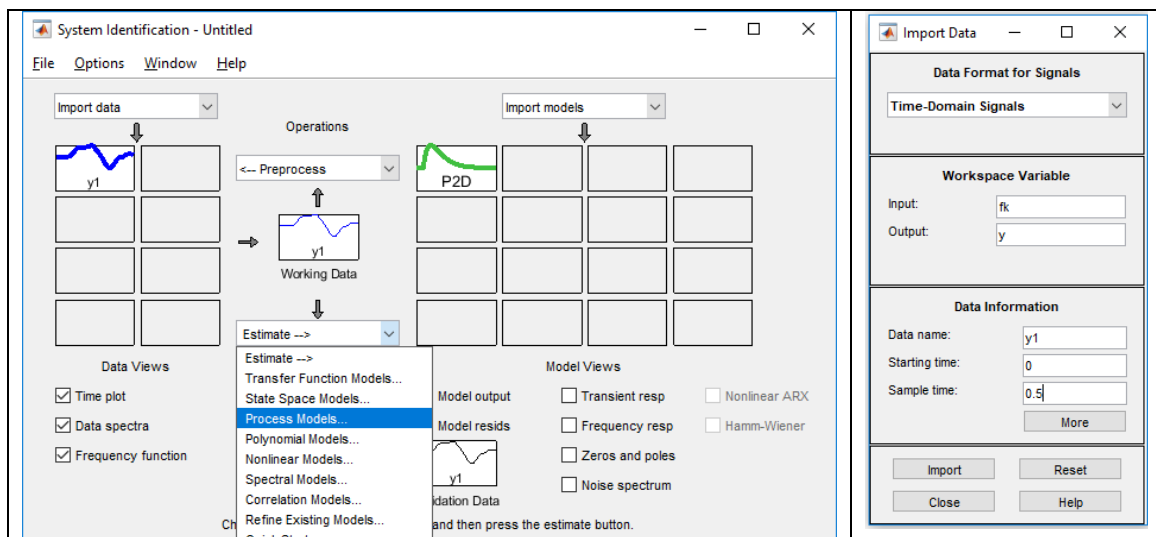


Рис. 3 Приклад імпорту змінних  $f_k(t)$ ,  $y(t)$  в пакет System Identification



Звідті вони імпортувались в пакет System Identification (див. рис. 3), функціонал якого дозволяє отримати реалізації цих змінних, їх спектри, а також амплітудо- і фазочастотні характеристики каналу (див. рис. 4).

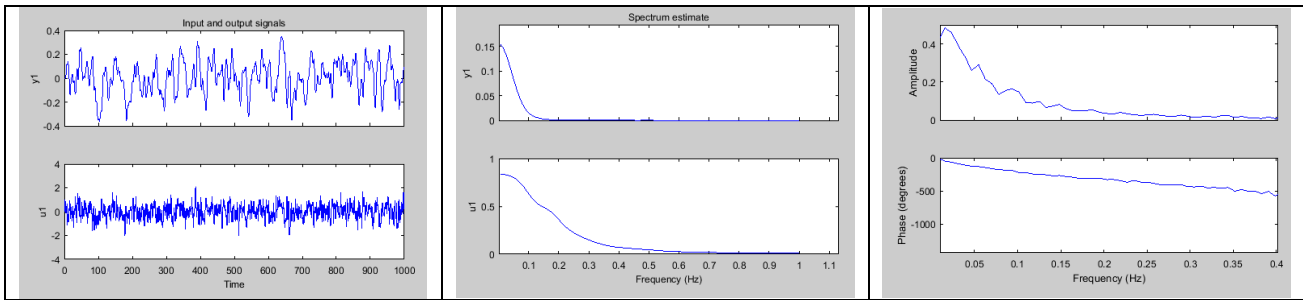


Рис. 4 Приклад графіків змінних  $f_k(t)$ ,  $y(t)$  для їх подальшого аналізу

Попередній аналіз графіків рис. 4 дозволяє провести структурну ідентифікацію моделі каналу  $f_k(t) - y(t)$  за ознаками, які наведені, наприклад, в [7]. Після вибору структури автоматично обраховуються параметри моделі.

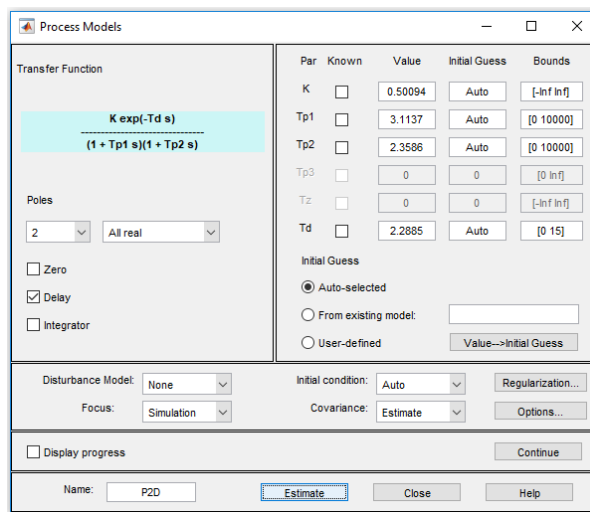


Рис. 5 Приклад результатів ідентифікації моделі каналу контрольованих збурень  $f_k(t) - y(t)$

Отриману модель з ім'ям P2D можна експортувати в Simulink в блок Idmodel (див. рис. 2) та провести порівняння реалізацій тестового ОК та його моделі.

4.2 Властивості окремої змінної в SAP, наприклад, контрольованого збурення  $f_k(t)$ , можна також оцінити завдяки використанню пакету SPTool. При імпорті змінної в пакет слід вказати її ім'я та частоту дискретизації. На рис. 6 частота дискретизації (Sampling Frequency) становить  $F_s=1/T_s=2$  Гц.

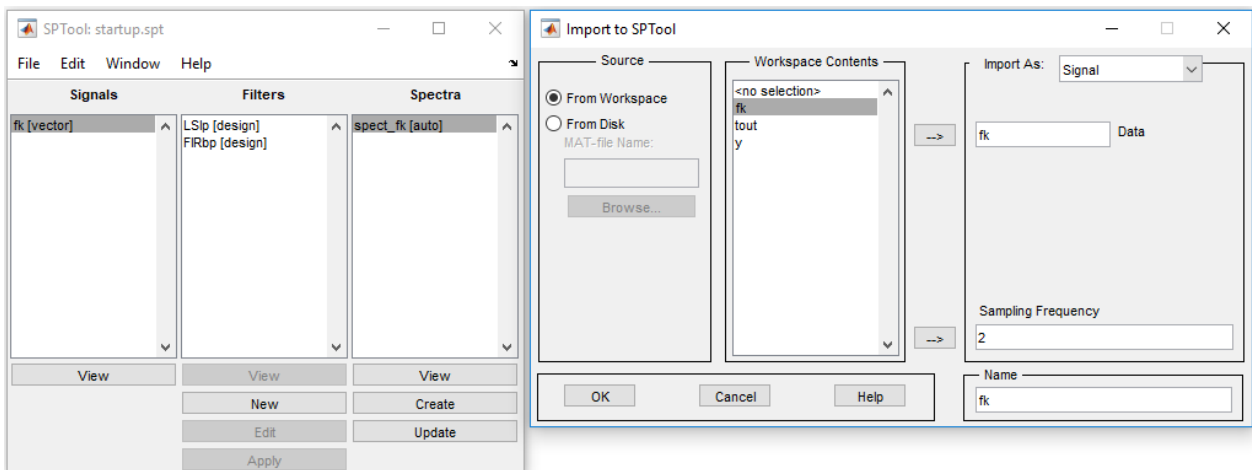


Рис. 6 Приклад імпорту змінної  $f_k(t)$  в пакет SPTool



Функціонал пакету дозволяє отримати графік змінної  $f_k(t)$ , його статистику, в тому числі оцінку середньоквадратичного відхилення RMS, а також графіки спектральної щільності потужності з різними методами усереднення.

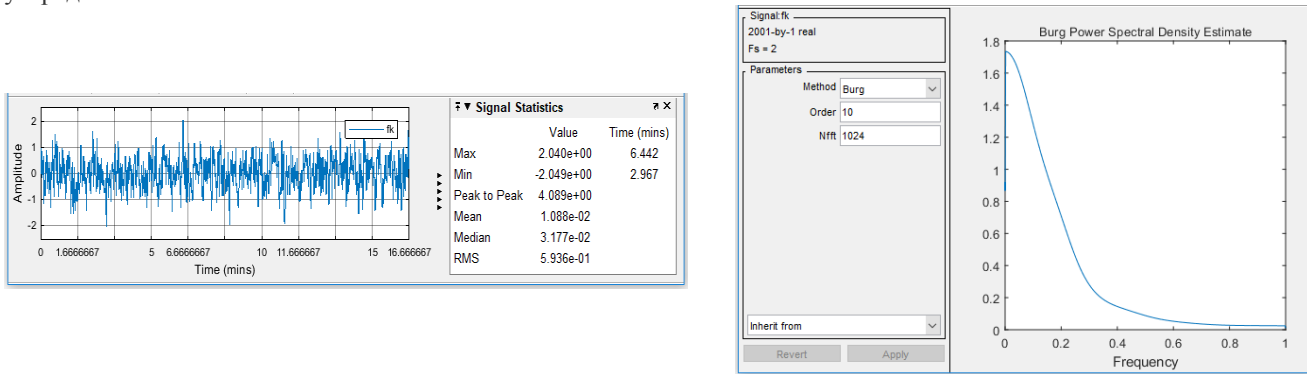


Рис. 7 Приклад оцінки властивостей змінної  $f_k(t)$  в пакет SPTool

## 5. Результати досліджень

5.1 Для ідеалізованих умов, тобто при відсутності впливу на тестовий ОК неконтрольованих збурень, проведені експерименти, в яких змінювалось значення часу запізнення  $\tau_o$  ОК і здійснювалась ідентифікація параметрів його моделі по каналу контрольованих збурень  $f_k(t) - y(t)$ . Результати експериментів зведені в табл. 1.

Табл. 1. Вплив часу запізнення  $\tau_o$  тестового ОК на параметри його моделі

$\tau_o$ var, c	0,75	1,5	3,0	6,0	
$\tau_m$ , c	1,02	1,79	3,29	6,29	
$K_m$	0,5	0,5	0,5	0,5	$K_o=0,5$
$T_{m1}$ , c	2,76	3,11	3,11	2,36	$T_{o1}=3$ c
$T_{m2}$ , c	2,72	2,36	2,36	3,11	$T_{o2}=3$ c

Найбільша відносна похибка в визначенні запізнення  $\tau_m$  склала 36%, найбільша відносна похибка в визначенні постійної часу  $T_m$  склала 21%. Коефіцієнт передачі  $K_m$  у всіх випадках визначався точно.

5.2 Визначення впливу неконтрольованого збурення  $f_n(t)$  на параметри моделі ОК при ідентифікації параметрів його моделі по каналу контрольованих збурень  $f_k(t) - y(t)$  проводилося для двох варіантів спектрального складу  $f_n(t)$ . Для цього при моделюванні  $f_n(t)$  постійна часу формуючого фільтру встановлювалась на значення  $T_{fk}=1$  c;  $T_{fk}=10$  c. Результати експериментів зведені в табл. 2.

Найбільша відносна похибка в визначенні запізнення  $\tau_m$  склала 25%, найбільша відносна похибка в визначенні постійної часу  $T_m$  склала 50%. Відносна похибка при визначенні коефіцієнта передачі  $K_m$  склала 10%. Додаткові експерименти показали, що точність ідентифікації параметрів в більшій мірі залежить не від спектрального складу неконтрольованих збурень  $f_n(t)$ , а від їх інтенсивності (значення RMS).

Табл. 2. Вплив неконтрольованого збурення  $f_n(t)$  на параметри моделі ОК

Графіки $f_n(t)$	Параметри моделі	
	Параметри ОК	Параметри моделі
	$K_o=0,5$ $T_{o1}=3$ c $T_{o2}=3$ c $\tau_o=1,5$ c	$K_m=0,51$ $T_{m1}=4,18$ c $T_{m2}=1,49$ c $\tau_m=1,88$ c
		$K_m=0,51$ $T_{m1}=3,66$ c $T_{m2}=1,95$ c $\tau_m=1,8$ c

## 6. Обговорення результатів

Наведені результати експериментів дають змогу стверджувати, що за рівнем точності отриманих параметрів моделі, наочності та трудовитрат вказані пакети програм можуть бути рекомендовані для використання в учбових задачах. Застосування цих пакетів для вирішення задач ідентифікації об'єктів в промисловості потребує більш детального їх вивчення.



При моделюванні САР в середовищі Simulink слід вибирати крок квантування за часом не менше 0,1 с, оскільки сучасні промислові контролери, в основному, не в змозі забезпечити менший крок квантування. Вибір частоти зрізу формуючого фільтру для контрольованих збурень  $f_i(t)$  слід узгоджувати з діапазоном частот власного руху САР. Детальніше це питання викладене, наприклад, в [8].

## 7. Висновки

При відсутності неконтрольованих збурень зміна часу запізнення тестового об'єкту керування не суттєво впливає на точність ідентифікації параметрів його моделі.

Ця точність в більшій мірі залежить від інтенсивності неконтрольованих збурень, ніж від їх спектрального складу.

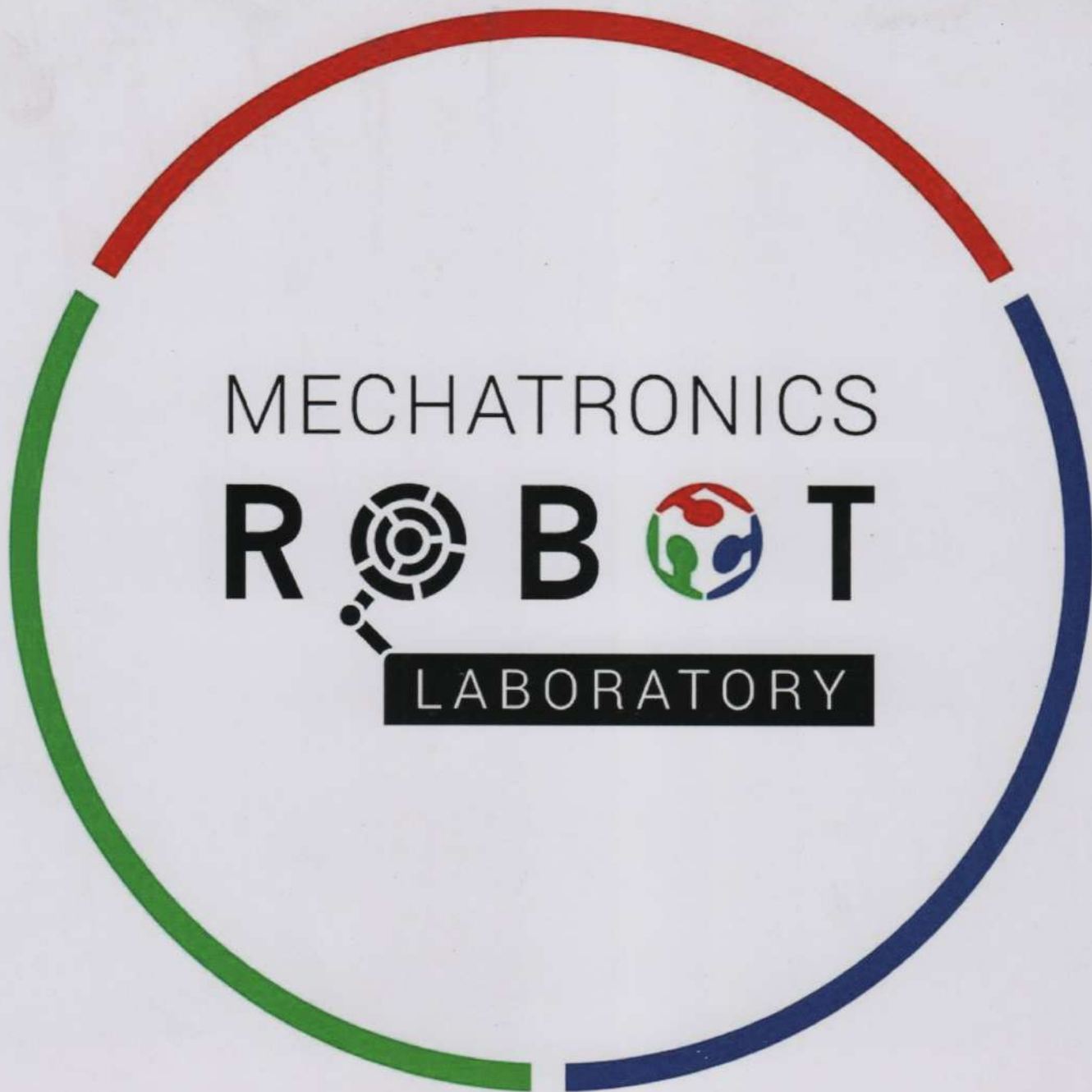
В цілому пакети програм Signal Processing Toolbox та System Identification Toolbox можуть бути рекомендовані для підготовки спеціалістів з автоматизації виробничих процесів в отриманні навичок з аналізу сталих процесів в САР.

## Список використаних джерел

- [1] Isermann R, Munchhof M. Identification of Dynamic Systems. Berlin: Springer, 2011. 710 p.
- [2] Хобин В.А. Системы гарантирующего управления технологическими агрегатами: основы теории, практика применения. Одесса: ТЭС, 2008. 306 с.
- [3] Signal Processing Toolbox User's Guide. Natick: MathWorks Inc., 2001. 800 p.
- [4] Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб: Питер, 2006. 751 с.
- [5] Ljung L. System Identification Toolbox™ Getting Started Guide. Natick: MathWorks Inc., 2015. 531 p.
- [6] Дьяконов В. Simulink 5/6/7: Самоучитель. Москва: ДМК-Пресс, 2008. 784 с.
- [7] Жигайло А.М., Хобин В.А. Расширение метода типовой статистической идентификации на модели объектов с запаздыванием. Одесса. *Автоматизация технологических и бизнес-процессов*. 2011. №5. С. 3-14.
- [8] Хобин В.А., Левінський В.М. Адаптивне керування об'єктами технологічного типу: алгоритми пасивного самоналагодження коефіцієнту передачі регуляторів. Одеса: Гельветика, 2019. 228 с.

## References

- [1] Isermann R, Munchhof M. Identification of Dynamic Systems. Berlin: Springer, 2011. 710 p.
- [2] Khobin V.A. Sistemyi garantiruyuschego upravleniya tehnologicheskimi agregatami: osnovyi teorii, praktika primeneniya. Odessa: TES, 2008. 306 p.
- [3] Signal Processing Toolbox User's Guide. Natick: MathWorks Inc., 2001. 800 p.
- [4] Sergienko A.B. Tsifrovaya obrabotka signalov. SPb: Piter, 2006. 751 p.
- [5] Ljung L. System Identification Toolbox™ Getting Started Guide. Natick: MathWorks Inc., 2015. 531 p.
- [6] Dyakonov V. Simulink 5/6/7: Samouchitel. Moskva: DMK-Press, 2008. 784 p.
- [7] Zhigaylo A.M., Hobin V.A. Rasshirenie metoda tipovoy statisticheskoy identifikatsii na modeli ob'ektov s zapazdyivaniem. Odessa. *Avtomatizatsiya tehnologicheskikh i biznes-protsessov*. 2011. No.5, pp. 3-14.
- [8] KhobIn V.A., LevInskiy V.M. Adaptivne keruvannya ob'Ektami tehnologIchnogo tipu: algoritmi pasivnogo samonalagodzhennya koefltsIEntu peredachI regulyatorIv. Odesa: Gelvetika, 2019, 228 p.



Laboratory of Mechatronics and Robotics in Odessa National Academy of Food Technologies was established in 2014. It is the first co-work space with the widely developed material base. The main aim of Laboratory is to popularize technical education in general and robotics in particular. In this regard Laboratory provides open access for everyone (conditions for access – 20 % of the time should be voluntarily devoted to social events that are valuable for Laboratory). Laboratory of Mechatronics and Robotics consists of eight auditoriums: workroom for prototyping, specialized auditorium of industrial pneumatic robotics, specialized auditorium of industrial electrical robotics, specialized auditorium of portable robotics, specialized auditorium of industrial hydraulic robotics, recreation zone for relaxation, a head office and a small storeroom. All the auditoriums have all the necessary stands and equipment for students' education process, for work on the projects and conducting of research.

Kanatnaya St, 112, Odessa, 65039, Ukraine  
+380487124254

[mechatronics.robotlab@gmail.com](mailto:mechatronics.robotlab@gmail.com)  
<http://www.robot.onaft.edu.ua/>

