

ЕНЕРГЕТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В БЕЗПЕЦІ ТА ОБОРОНІ

ENERGY TECHNOLOGIES IN SECURITY AND DEFENSE

УДК 623.674

DOI 10.20535/1813-5420.1.2025.324265

Оксана Вовк¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-7531-9847

Стефан Зайченко¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8446-5408

Муцзи Лі¹, аспірант, ORCID 0009-0001-8063-6206

Віктор Городецький¹, канд.ф-м. наук, доцент, ORCID 0000-0003-4642-3060

Сергій Король², канд. техн. наук, доцент

Вадим Шаленко³, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6984-0302

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

²Інститут технічної теплофізики НАН України

³Київський національний університет будівництва і архітектури

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ РОЗМІНУВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИМ РУЙНУВАННЯМ

У дослідженні представлено обґрунтування параметрів процесу розмінування методом гідродинамічного руйнування, який дозволяє ефективно знешкоджувати військові міни без ризику детонації основного заряду. Такий підхід підвищує безпеку під час операцій з розмінування та мінімізує ризики небажаних наслідків у зонах конфліктів. Проведено детальний аналіз конструктивних особливостей найпоширеніших типів детонаторів і підривачів військових мін, що дало змогу ідентифікувати ключові елементи конструкції, які впливають на функціональність і надійність вибухонебезпечних пристроїв. На основі цього аналізу було розроблено логічну модель об'єкта дослідження, яка враховує взаємозв'язок між основними структурними елементами системи та дозволяє визначити можливі стани системи. Для ідентифікації вразливих елементів військових мін серед нескінченної кількості можливих комбінацій фізичних параметрів запропоновано використання інформаційного критерію, заснованого на понятті ентропії Шеннона. Використання цього критерію дозволило визначити елементи, які суттєво знижують ступінь невизначеності системи та мають вирішальний вплив на її функціональність. Вразливий елемент визначено як структурну одиницю пристрою, яка характеризується найменшою залишковою ентропією системи та найбільшим впливом на стан вибухонебезпечного об'єкта. У ході дослідження встановлено, що найвразливішим елементом, від якого залежить загальна працездатність системи, є корпус підривача боєприпасу, що відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки та стабільності конструкції. Дослідження не лише висвітлює інноваційне використання гідродинамічного руйнування в операціях з розмінування, але й глибоко аналізує взаємодію структурних та функціональних аспектів вибухонебезпечних пристроїв. Застосування ентропії Шеннона для оцінки вразливості системи надає нову аналітичну основу для технологій розмінування. Цей підхід дозволяє точно ідентифікувати критичні компоненти, вихід з ладу яких може знешкодити вибухонебезпечний пристрій без виклику небажаних наслідків. Акцент на корпусі підривача як на головному вразливому елементі підкреслює важливість розуміння його механічних властивостей і взаємодій у межах пристрою. Цей висновок відкриває нові можливості для розробки спеціалізованих інструментів і методів, спрямованих на безпечніше й ефективніше порушення функціональності вибухонебезпечних пристроїв. Інтеграція передових аналітичних моделей із практичними методами розмінування робить вагомий внесок у розвиток гуманітарного розмінування та військової інженерії.

Ключові слова: система розмінування, вибухонебезпечний пристрій, військова міна, підривачач боєприпасів

Вступ

Військові міни та снаряди залишаються серйозною загрозою для військових підрозділів, мирних жителів і інфраструктури в умовах конфлікту або після його завершення. Пристрої для знешкодження військових мін дозволяють видаляти цю загрозу, забезпечуючи безпеку і захищаючи життя людей. Багато

країн зобов'язані міжнародними угодами знешкоджувати міни на своїй території. Розробка ефективних пристроїв для знешкодження військових мін та снарядів допомагає виконувати ці зобов'язання і підтримувати міжнародний престиж. В умовах війни або конфлікту наявність ефективних засобів для швидкого та безпечного знешкодження військових мін дозволяє зберігати бойові можливості і підтримувати високий рівень готовності військових підрозділів. Видалення військових мін здатне значно покращити гуманітарну ситуацію в постраждалих районах, де військові міни залишаються загрозою для мирного населення, перешкоджаючи поверненню людей до їхніх домівок і відновленню соціально-економічного життя. Розробка нових та вдосконалення існуючих технологій для знешкодження військових мін сприяють технологічному розвитку в країні, стимулюючи наукові дослідження та інновації в галузі безпеки і оборони. Отже, розробка пристроїв для знешкодження військових мін та снарядів є важливою складовою політики безпеки держави, спрямованою на захист її громадян, забезпечення військової готовності і виконання міжнародних зобов'язань. Це необхідна ініціатива для зміцнення обороноздатності та забезпечення стабільності національного і міжнародного рівня.

Основною ідеєю розробки є створення компактного надійного пристрою, що надасть змогу особовому складу військових частини та інших підрозділи, що спеціалізуються на гуманітарному розмінуванні територій в польових умовах провести знешкодження військових мін(снарядів) з малою вірогідністю детонації. Для досягнення поставленої мети пропонуються використати сучасні досягнення у сфері дослідження фізики кумулятивної перфорації. В залежності від необхідності потужності кумулятивного заряду пропонується використання ударників різної конструкції.

Для зменшення динамічного впливу на вибухову величину пропонується використання декілька шарів композитних матеріалів на основі штучних волокон з різними фізико-механічними властивостями і функціональним призначенням. Використання еластичної основи(шару), яка виготовляється в польових умовах, дозволяє фіксувати пристрій в необхідному положенні та поглинає вибухову хвилю від кумулятивного заряду. Поглинання енергії вибухової хвилі, що має радіальну орієнтацію відносно заряду відбувається композитним матеріалом на основі неорганічних волокон(кварца (кристаллического кремнезема (SiO_2)), щелочного полевого шпата, плагиоклаза і полевого шпата) з вязучою речовиною.

Окремою частиною розробки є створення надійного та відносно дешевого способу дистанційного приведення в дію пристрою за допомогою радіоелектродетонатора. З метою здешевлення і максимального поширення розробленого пристрою планується використання максимально доступних радіоелементів та технологій, таких як мікроконтролери з вбудованими модулями радіо частот, низьковартісні радіочастотні передавачі та приймачі, що вже використовуються в промисловості та доступні для широкого кола розробників. Особлива увага при цьому приділяється вибору компонентів, що мають оптимальне співвідношення ціни та якості, що дозволяє досягти необхідних технічних характеристик при мінімальних витратах на виробництво. Такий підхід забезпечить зростання конкурентоспроможності пристрою на ринку і позитивно вплине на його поширення.

Кумулятивний заряд (КЗ) – вибуховий пристрій, ефективність якого визначається глибиною пробиття перешкоди кумулятивною струменем (КС) або визначається енергією ударного взаємодії з перешкодою КС, ударного ядра (УЯ) (explosively formed penetrator), які утворюються при схлопуванні лайнера. За останні 15-20 років кількість публікацій, присвячених дослідженням функціонування КЗ, помітно збільшилася. Переважно це сталося завдяки появі програмних продуктів, що дозволяють проводити комп'ютерне моделювання процесу вибуху КЗ, а саме: детонації вибухової речовини (ВР), деформації корпусу КЗ, схлопування лайнера з утворенням КС або УЯ та проникнення КС (УЯ) в перешкоду. У багатьох роботах результати розрахунків і адекватність математичних моделей, що описують поведінку матеріалів в екстремальних умовах, перевірялися експериментально або порівнювалися з іншими результатами досліджень, опублікованих іншими вченими [1-8]. Ряд робіт присвячений вивченню матеріалознавчих аспектів функціонування КЗ [3-6]. Аналіз робіт [1-6] дозволяє виділити основні особливості конструкції КЗ, що визначають глибину пробиття перешкоди та відповідний об'єм каналу в ній: товщина, форма і матеріал лайнера, енергія вибуху заряду ВР, схема ініціювання детонації заряду. У роботі [2] крім іншого отримані кількісні оцінки впливу на пробиття перешкоди окремих геометричних параметрів кумулятивного заряду або їх комбінації. Зазначено, що найбільший вплив на ефективність КЗ має розташування точки ініціювання детонації заряду ВР (схеми збудження) і товщина лайнера, і значно менший вплив має значення кута у вершині конуса в діапазоні $44^\circ - 46^\circ$ і відстань до перешкоди. Також слід зазначити дві ідеї підвищення ефективності КЗ, пов'язані зі зміною механізмів схлопування облицювань КЗ [3, 7]. Як показав аналіз процесу схлопування півсферичної облицювання дегресивної товщини (значення товщини лайнера зменшується від його вершини до основи), фізична причина збільшення швидкості формуючого при цьому струминного течії полягає в тому, що в такій конструкції КЗ створюється умова для обжаття облицювання, близьке до сферично-симетричного. У результаті посилюється прояв ефекту сферичної кумуляції. Масово-швидкісні параметри КС при цьому наближаються до рівня параметрів КС при схлопуванні конічних лайнерів, а в разі оптимізації форми лайнера можливо можуть перевищувати їх [7]. У роботі [8] описаний інший механізм схлопування

конічної облицювання, відмінний від механізму схлопування зарядів традиційної конструкції (конус або близькі до нього форми). Для цього в зрізаній вершині конуса лайнера розміщують додатковий елемент у вигляді спеціальної пластини. При відображенні набігаючих потоків від цієї пластини відбувається схлопування матеріалу лайнера під кутом, більшим за 180° . У результаті можуть бути отримані КС з більшою кінетичною енергією, ніж КС при традиційній схемі схлопування конічного лайнера, що і підтверджують результати моделювання функціонування такого заряду [6]. Для формування потоку, що може руйнувати елементи військових мін доцільно використати гідродинамічний ефект Юткіна. Використання даного ефекту дозволить зробити процес розмінування більш екологічно чистим та безпечним.

У роботі [7] автори досліджували вплив кута у вершині конуса лайнера, відстані до перешкоди і довжини кумулятивних зарядів на ефективність проникнення в бетонні цілі. Для цього використовувалися конічні лайнера, у яких значення кута при вершині були 90° , 100° і 110° при зовнішньому діаметрі заряду 76 мм. Комп'ютерне моделювання в цьому дослідженні було виконано з використанням програмного забезпечення LS-DYNA, і результати показали, що кут конуса 90° призводить до формування найдовшої КС з найбільшим значенням швидкості головної частини приблизно через 30-40 мкс після детонації заряду ВР. У цьому випадку оптимальна відстань до перешкоди становила від 70 до 100 мм, при якій струмінь могла досягти максимальної швидкості і довжини.

Автор роботи [8] провів дослідження впливу товщини алюмінієвого лайнера і кута при його вершині на ефективність пробиття перешкоди. При збільшенні кута лайнера з 100° до 120° глибина проникнення КС зменшується, що свідчить про зниження її швидкості, а при збільшенні товщини лайнера з 2% до 8% калібру КЗ глибина проникнення збільшується.

Для створення даної системи необхідно визначити вразливі елементи системи які не дозволять спрацювати головному заряду. Мінімізувати вірогідність спрацювання основного заряду військового міни можливо при розгляді об'єкта в цілому з визначенням його структури, можливих станів і можливих руйнувань елементів.

Мета і завдання дослідження

Метою даного дослідження є розробка нової системи розмінування на основі визначення основних вразливих структурних елементів і станів військових мін з врахуванням особливостей взаємодії складових підривачів боєприпасів.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувались наступні задачі:

- Розробка структурної схеми військових мін з врахуванням особливостей взаємодії складових, що дозволить встановити взаємні впливи різних частин об'єкта дослідження на його стан;
- Визначення можливих станів військових мін;
- Встановлення вразливих елементів системи для створення системи розмінування гідродинамічним руйнуванням.

Матеріал і результати дослідження

При розробці структурної схеми військової міни розглянемо типову конструкцію яка знайшла найбільшого застосування. Аналогом більшості пристроїв що використовуються на території України є противотанкова мина ТМ-89. Бойова частина складається із сталевго корпусу з кумулятивним облицюванням, спорядженого зарядом ВР. У верхній частині корпусу є кільцевий вузол кріплення підривника, що містить сталеве і дюралюмінієве кільця і гумову прокладку. Сталеве дно міни з'єднане з корпусом закаткою і має дві заливальні горловини, закриті кришками, і скобу з ручкою матер'яною б для перенесення міни, склянка під детонатор, закритий у транспортному положенні поліетиленовою заглушкою, і вузол кріплення детонатора. Вузол кріплення детонатора має сталеву кришку з пружинним фіксатором, закріплену на дні за допомогою петлі і закриту транспортному положенні стрічкою червоного кольору. Вибух призначений для підриву заряду ВР міни при впливі на неї магнітного поля танка, бронетранспортера або автомобіля. Підривач боєприпасу складається з корпусу, дистанційного механізму, гідросповільнювача, електронного блоку, запобіжно-виконавчого механізму та містить елементи вогневого ланцюга: електрозапальник, піротехнічний підсилювач і два капсулі-детонатори. Знизу корпус підривника закритий кожухом. Корпус підривача боєприпасу виготовлений з алюмінієвого сплаву. Дистанційний механізм призначений для приведення в дію та для забезпечення безпеки під час встановлення мін загороджувачем та вручну. Дистанційний механізм складається з втулки, кришки, котушки і скоби. Кришка утримується у втулці за рахунок розвальцованого ковпачка. Для захисту кришки від випадкового вибуху на неї надягається чека, яка застібається шпилькою. Нитка, намотана на котушку, утримує скобу у нижньому положенні. Один кінець нитки прикріплений до кришки дистанційного механізму, другий вільний. Скоба утримує шток гідросповільнювача в притисненому стані і не дає можливості движку запобіжно-виконавчого механізму підривника перевестися в бойове положення. Пусковий механізм на відміну дистанційного механізму немає нитки для дистанційного пуску. Він складається з втулки, кришки (чорного кольору), втулки з гвинтами і ковпачком і зрізної чеки. Кришка пускового механізму утримується у втулці за допомогою втулки, ковпачка та зрізної чеки. Гвинтом

пусковий механізм утримує шток гідросповільнювача у притисненому положенні. Зусилля зриву кришки пускового механізму таке саме, як і у дистанційного механізму. Вибух міни допускає спорядження його двома типами джерела струму ампульним, що встановлюється на заводі-виробнику, або гальванічним елементом, що встановлюється перед застосуванням міни. Конструкція заглушки джерела струму залежить від типу джерела струму, що застосовується. При використанні у підривнику вбудованого джерела струму центральний отвір заглушки закрито поліетиленовою заглушкою з петлею зі стрічки червоного кольору, а при використанні змінного джерела струму верхня частина заглушки виконана суцільною з поглибленням під виступи ключа. Рукоятка з валиком через пружину кручення з'єднана з двигуном запобіжно-виконавчого механізму підривника і призначена для переведення підривника з транспортного положення в бойове. Колір поверхні рукоятки, зверненої назовні, відповідає положенню: червоний - транспортному, захисний бойовому. Рукоятка законтрена стопором і опломбована пломбою. Стопор рукоятки має із зовнішнього боку паз під крюкоподібний виступ ключа. Гідросповільнювач забезпечує час далекого зведення підривника від 20 до 700 с. Він встановлений у центральному гнізді корпусу підривника під дистанційним (пусковим) механізмом. Гідросповільнювач складається з корпусу, кришки, штока, поршня і пружини. Корпус заповнений морозостійким каучуком. Електронний блок призначений для обробки, посилення і перетворення сигналу, створюваного технікою, що рухається, в електричний сигнал. Електронний блок розміщується усередині корпусу підривника. Несучим вузлом блоку є основа, до якого кріпляться з одного боку друкована плата з радіоелементами, магнітопровід з індукційною котушкою датчика, а з іншого боку корпус запобіжно-виконавчого механізму підривника. Основа електронного блоку жорстко кріпиться до корпусу підривника за допомогою обтискання кожуха. Для підвищення механічної міцності внутрішній об'єм корпусу з електронним блоком залитий пінополіуретаном. Запобіжно-виконавчий механізм підривника призначений для запалення порошу ВЗ та пуску ПІМ міни при спрацьовуванні підривника, механічного розриву в вогневих ланцюгах підривник - ВЗ, підривник - ПІМ і для розриву електричного ланцюга підривника в транспортному положенні. Запобіжно-виконавчий механізм складається з корпусу і двигуна, в якому встановлені капсули-детонатори і поворотна пружина. Центральний капсуль-детонатор закріплений в двигуні бойком, а бічний - різьбовою втулкою. У корпусі запобіжно-виконавчого механізму розміщені електрозапальник, піротехнічний підсилювач, нерухомий контакт штирьової і поворотний контакт, що має механічний зв'язок з движком. У транспортному положенні контакти розімкнуті. Вишибний заряд призначений для видалення підривника та маскувального шару ґрунту із зони формування кумулятивного струменя перед вибухом міни. Вишибний заряд складається з дюралюмінієвого корпусу, спорядженого порохом зарядом.

Серед найбільш складних елементів які мають найнижчу надійність є підривача боеприпасу. Руйнування одного з елементів що призводить до ініціювання приведе до нейтралізації об'єкту. Розглянемо структурну схему підривача боеприпасу(рис. 1)

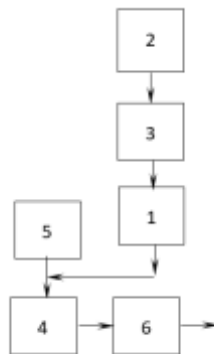


Рисунок 1-Логічна модель підривача боеприпасу:

1 - корпус; 2 - дистанційного механізму; 3 - гідросповільнювач, 4 - електронного блоку, 5 - запобіжно-виконавчий механізм; 6 - елементи вогневого ланцюга

Для того щоб система працювала з максимальною ефективністю, в кожному конкретному випадку необхідно вирішити задачу вибору мінімально достатньої кількості елементів для ураження[7]. Одним з головних критеріїв вибору елементу системи які характеризують технічний стан є інформативний. Елемент вибраний за інформативним критерієм дозволяє з найбільшою вірогідністю вивести підривач боеприпасу з працездатного стану без детонації головного заряду.

Для вибору елемента структурною схемою. Система, що розглядається складається з $N = 6$ елементів. За можливі стани приймемо відмову кожного елементу. Контроль стану підривача боеприпасу

плануємо за кількістю параметрів рівному кількості елементів $k = 6$. В результаті дослідження відмов елементів системи створена таблиця станів (табл. 1). Вірогідність відмов кожного елементу для попереднього розгляду приймемо рівними:

$$P(S_i) = 1/N = 1/6. \quad (1)$$

В даному випадку ентропія системи з кінцевою кількістю станів максимальна.

Вихідна ентропія системи визначається кількістю можливих станів:

$$H(S_i) = \sum_{i=1}^n P(N_i) \log_2 P(N_i) = -6 \frac{1}{6} \log_2 \frac{1}{6} = 2,582 \text{ біт}. \quad (2)$$

Позначимо через m_1 - число одиниць в кожному рядку таблиці, m_0 - число нулів в тому ж рядку. Залишкова невизначеність при контролі кожного параметра на першому кроці обчислюється за формулою

$$H\left(\frac{A}{Z_k}\right) = \frac{m_1}{N} \log_2 m_1 + \frac{m_0}{N} \log_2 m_0. \quad (3)$$

Результати розрахунку залишкової ентропії наведені в останньому стовпчику табл. 1.

Таблиця 1. – Таблиця станів

Діагностичний параметр Z_k	Стани						$H\left(\frac{A}{Z_k}\right)$
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	
1	0	0	0	1	1	1	3,662
2	1	0	1	1	1	1	3
3	1	0	0	1	1	1	3,662
4	0	0	0	0	0	1	3,662
5	1	1	1	1	0	1	3,011
6	0	0	0	0	0	0	3,662

На основі розрахунків побудовано діаграму ентропії системи, яка дозволяє встановити інформативну значимість діагностичного параметру.

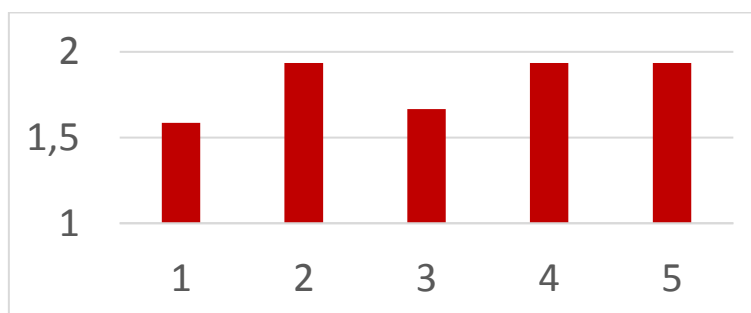


Рисунок 2 - Діаграма ентропії системи

Дійсно, що елемент системи, який має найменшу залишкову ентропію, дає найбільшу кількість інформації про її стан, і тому він повинен руйнуватись у першу чергу. Таким елементом буде Z_1 . Тобто дивлячись на структурну схему підривача боеприпасу (рис. 1) даний номер відповідає корпусу. Наступними елементами, які суттєво впливають на ентропію системи будуть Z_2, Z_4, Z_5 . Дані номери відповідають системам дистанційного механізму, електронного блоку, запобіжно-виконавчому механізму.

Висновки

Розроблено структурну схему військових мін, яка враховує особливості взаємодії складових, що дозволило визначити взаємні впливи різних частин об'єкта дослідження на його стан.

Визначено можливі стани військових мін, що є основою для аналізу їхньої поведінки в різних умовах.

Встановлено вразливі елементи системи, що створює підґрунтя для розробки ефективної системи розмінування. Данні результати забезпечують базу для подальших досліджень та розробок у сфері знешкодження мін шляхом гідромеханічного руйнування.

S. Zaichenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-8446-5408

Muzi Li¹, master, ORCID 0009-0001-8063-6206

V. Gorodetsky¹, Cand. Sc. (Phys.,-Math.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4642-3060

S. Korol², Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof

V. Shalenko³, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6984-0302

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

²Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

³Kyiv National University of Construction and Architecture

JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE DEMINING PROCESS BY HYDRODYNAMIC DESTRUCTION

The study presents the rationale for the parameters of a mine clearance process using the method of hydrodynamic destruction, which enables the effective neutralization of military mines without the risk of detonating the primary charge. This approach enhances safety during demining operations and minimizes the risk of adverse consequences in conflict zones. A detailed analysis of the structural features of the most common types of military mine detonators and fuzes was conducted, allowing for the identification of key design elements affecting the functionality and reliability of explosive devices. Based on this analysis, a logical model of the research object was developed, accounting for the relationships between the primary structural elements of the system and enabling the determination of potential system states. To identify vulnerable elements of military mines among an infinite range of possible combinations of physical parameters, the use of an informational criterion based on Shannon's entropy concept was proposed. This criterion facilitated the identification of elements that significantly reduce system uncertainty and have a decisive impact on its functionality. The vulnerable element was defined as the structural unit of the device characterized by the lowest residual system entropy and the most significant influence on the state of the explosive object. The study concluded that the most vulnerable element, on which the overall functionality of the system depends, is the casing of the munition fuze, which plays a key role in ensuring the safety and stability of the design. The research not only highlights the innovative use of hydrodynamic destruction for demining operations but also delves deeply into the interplay of structural and functional aspects of explosive devices. The application of Shannon's entropy to assess system vulnerabilities provides a novel analytical framework for demining technology. This approach enables the precise identification of critical components whose failure could neutralize the explosive device without triggering unintended consequences. The emphasis on the fuze casing as the primary vulnerable element underscores the importance of understanding its mechanical properties and interactions within the device. This finding opens avenues for designing specialized tools and methods tailored to disrupt the functionality of explosive devices more safely and efficiently. By integrating advanced analytical models with practical demining techniques, the study contributes to a significant leap forward in the field of humanitarian demining and military engineering.

Keywords: demining system, explosive device, military mine, ammunition fuse.

References

1. Voitenko, Y., Sydorenko, Y., Zakusylo, R., Goshovskii, S., Zaichenko, S., & Boyko, V. On the Influence of the Liner Shape and Charge Detonation Scheme on the Kinetic Characteristics of Shaped Charge Jets and Explosively Formed Penetrators //Central European Journal of Energetic Materials. – 2023. – T. 20. – №. 4. <http://dx.doi.org/10.22211/cejem/173190>
2. Voitenko Y., Zakusylo R., Zaychenko S. Influence of the Striker Material on the Results of High-Speed Impact at a Barrier //Central European Journal of Energetic Materials. – 2021. – T. 18. – №. 3. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063785017090024>.
3. Zaichenko, S., Frolov, O., Stovpnik, S., & Veremiichuk, Y. (2018). Investigation of the change in the strength properties of a soil mass by mechanical sensing. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. (3 (9)), 19-26.
4. Voitenko, Y.I., Buhaets, V.P. The Effect of Aluminum on the Impact Properties of a Composite Shaped Charge Jet. Herald of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ser. «Mining» 2016, 30: 36-48
5. Rumyantsev B. V., Klimenko V. Yu. Phase Transformations in Copper Cumulative Jet Penetrating into Silicon Carbide // Technical Physics Letters. - 2011. - V. 37, no. 21. - p.p. 1130-1033.
6. Wu, J.; Wang, H.; Fang, X.; Li, Y.; Mao, Y.; Yang, L.; Yin, Q.; Wu, S.; Yao, M.; Song, J. Investigation on the Thermal Behavior, Mechanical Properties and Reaction Characteristics of Al-PTFE Composites Enhanced by Ni Particle.// Materials 2018, 11(9): 1741.
7. Fedorov S.V. On the penetration depth of a porous striker moving with a hypersonic velocity// Tech. Physics.. – 2007. – V. 52., # 10. – P. 1379-1382..
8. Vasilyev V.D., Grigryev A.Yu., Dunilov K.K., Semashkin G.V., Frolenkov Yu.A., Dushenok C. A. Method and device for the destruction of explosive objects. Patent 2500980 МПК F 42D5/04., 2013..

Надійшла: 06.02.2025

Received: 06.02.2025

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

UDC621.316

DOI 10.20535/1813-5420.1.2025.324268

J. Peretyatko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-1397-8078

Y. Trotsenko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-9379-0061

M. Haiko¹, student, ORCID 0009-0003-9856-7485

V. Svyatnenko¹, Senior lecturer, ORCID 0000-0002-0518-1045

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

SIMULATION AND ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THYRISTOR CONDUCTION TIME IN THREE-PHASE CONTROLLED RECTIFIERS ON HARMONIC DISTORTIONS IN THE POWER SUPPLY NETWORK

Background. Modern technologies related to power electronics and microprocessors create new challenges for ensuring high-quality electrical energy. The use of single-phase and three-phase rectifiers for supplying loads often leads to current waveform distortion, which negatively affects equipment performance and reduces the operational characteristics of energy systems. The main issue is harmonic distortion caused by load nonlinearity, which can degrade the quality of electrical energy and affect the performance of transformers and cable lines. **Objective.** The aim of the study is to analyze the changes in power quality indicators when the control angle of thyristors in a three-phase asymmetrical controlled bridge rectifier is modified. The study is conducted through analytical calculations and computer simulation. **Methods.** The research was carried out based on a simulation model of a three-phase asymmetric bridge rectifier. MATLAB® and Simulink® environments were used for simulating three cases: without a filter, with a filter but without considering the internal resistance of the transformer, and with a filter, taking into account the transformer's internal resistance. The simulation included an analysis of parameter changes at different thyristor control angles. **Results.** It was found that increasing the control angle leads to an increase in the harmonic distortion coefficient in the network, which may exceed the permissible limits defined by IEEE 519-2022 and DSTU EN 50160:2023 standards. The study also explored the impact of LC filters on power quality, particularly their negative effect in the form of a reduced power factor. **Conclusions.** The change in the thyristor control angle affects the quality of electrical energy by increasing harmonic distortion and reducing the power factor. The obtained results emphasize the need for careful selection of rectifier control parameters and harmonic filtering to ensure compliance with regulatory requirements. An important recommendation is to consider the internal resistances of transformers when designing such circuits, as they influence the level of current and voltage distortion in the electrical network.

Keywords: harmonic distortions, thyristor rectifier, total harmonic distortion, power quality, computer modeling

Introduction.

The development of modern household and industrial electrical equipment, closely related to the use of technologies involving power electronics and microprocessors, presents new challenges for ensuring proper power quality. Power electronics is a key component of power supplies for various types of equipment. Single-phase rectifiers are used for loads up to 1 kVA, while three-phase rectifiers are used for loads over 1 kVA [1]. Due to their functionality, these technologies improve energy efficiency and automation, finding applications in both domestic and industrial settings. Power converters are conventionally classified by their power rating and application area, as shown in Table 1.

During the rectification process, the current flows through semiconductor devices only for part of the cycle of the fundamental frequency. As a result, power converters are often viewed as devices for regulating DC voltage. If electrical energy is used in the form of alternating current but with a different frequency, the DC current obtained from the rectifier passes through an inverter, which converts it back into alternating current with the required frequency.

The nonlinear characteristics of the components in rectifier circuits can lead to a deterioration in the quality of electrical power in medium and high-voltage networks [2-4]. At the same time, the semiconductor devices themselves are sensitive to the quality of electrical power. Harmonic distortions of voltage and current, which arise due to the nonlinearity of end consumers, can affect the efficiency of parallel-connected power consumers. These distortions can reach distribution transformers, which are generally not designed to handle high levels of harmonic components.

Table 1. Classification of Power Rectifier Applications

High power	Medium power	Low power
In the metallurgy industry and high-voltage direct current power transmission systems.	In industry for controlling the speed of electric motors, as well as in the railway sector, electric welding equipment, and electrochemical technologies.	In household and entertainment devices: televisions, personal computers, chargers, uninterruptible power supplies, lighting systems, etc.

The nature of current distortion at the input of the rectifier largely depends on the chosen rectification scheme, even if a pure sinusoidal voltage is supplied to the converter input. However, this assumption is only valid under theoretical conditions, without considering the resistance of lines and transformer magnetization. Current distortions can negatively affect parallel-connected loads and equipment in the electrical network upstream of the energy flow through the point of common coupling [5-11]. The analysis of scientific research shows that higher harmonic components of voltage and current, caused by the nonlinearity of loads from end users, can significantly affect power transmission cable lines [5-6] and electrical equipment in the network [7-10], leading to a reduction in their lifespan and deterioration of operational characteristics. Furthermore, high-frequency harmonics increase losses due to eddy currents and hysteresis, resulting in the heating of transformers. These effects combine, creating issues in the operation of each component of the energy system [11, 12]. Research indicates that the problem of harmonic distortions is systemic, not local. The mutual influence of electrical equipment through the point of common coupling is presented in the form of a schematic diagram of the power grid in Figure 1.

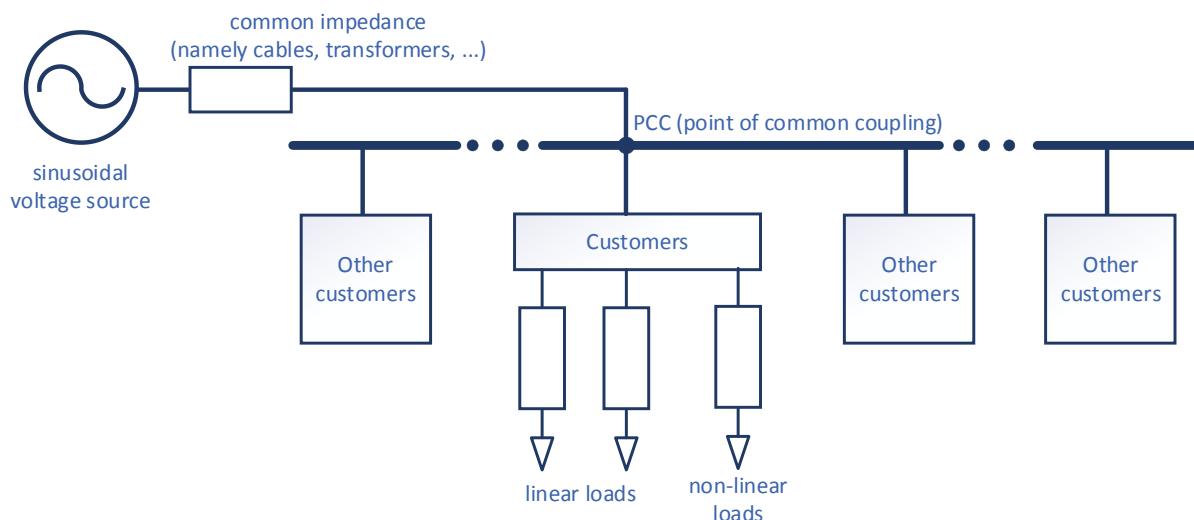


Figure 1 – Schematic diagram of the power supply for energy consumers

The analysis of the harmonic spectrum of the input current in single-phase and three-phase uncontrolled rectifiers has been widely conducted and published, as noted in [13-15]. In [16], based on simulation modeling, as well as theoretical and experimental methods, the results of studying the impact of changes in the control angle, the harmonic spectrum of the input current in single-phase controlled rectifiers without using a filter, and the impact of the transformer are presented. In addition, experimental evaluation and analysis of power quality in [17, 18] demonstrate significant distortion of the current waveform by certain household appliances containing single-phase rectification circuits of different configurations.

Although the use of uncontrolled rectification circuits remains widespread, the control of the rectified voltage is achieved through the use of thyristor circuits. Most textbooks on power electronics provide a detailed study of harmonics at the output of controlled rectifiers, but such an analysis of the input current is lacking both from an empirical and theoretical perspective.

Purpose of work.

The study is focused on analyzing the changes in power quality indicators from the power source due to the variation in the control angle of the thyristors in a three-phase asymmetric controlled bridge rectifier, using analytical calculation methods and computer modeling.

Research material.

Voltage and current deviations from the ideal sinusoidal waveform, particularly harmonic distortions, are important factors affecting power quality indicators. Furthermore, these phenomena are closely related to electromagnetic compatibility, which ensures the proper functioning of electrical devices in a shared electromagnetic environment.

Regulation of power quality requirements is carried out at the international level according to standards developed by the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) in the United States [19] and the International Electrotechnical Commission (IEC) for European Union countries [20]. The main focus of these standards is on defining the maximum allowable values of power quality indicators that must be maintained at the points of common coupling of consumers to AC networks of different voltage classes under normal operating conditions.

In Ukraine, power quality requirements are regulated by the DSTU EN 50160:2023 standard [20], which sets the permissible voltage parameters at points of consumer connection. At the same time, the IEEE 519-2022 standard regulates not only voltage characteristics but also the permissible levels of current harmonic distortions at points of consumer connection (as shown in Figure 1).

The degree of harmonic distortion in the current is characterized by the Total Harmonic Distortion (THD) factor, which is determined by the following formula:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{(h)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100\% ,$$

where: h – harmonic order; $I_{(h)}$ – root mean square (RMS) value of the individual harmonic component of order h for the current; $I_{(1)}$ – the root mean square (RMS) value of the fundamental harmonic (first-order component) for the current.

To study the complex impact of the nonlinearity of the rectifier circuit elements, the control angle of the thyristors, the filter parameters, and the internal resistance of the transformer’s secondary winding on the propagation of harmonics in the power supply network, a series of studies have been conducted. The studies also aim to analyze the harmonic levels and determine the moment when the regulatory limits are exceeded for three cases:

1. Without considering the filter and the internal resistance of the transformer's secondary winding.
2. Considering the filter, but without taking into account the internal resistance of the transformer's secondary winding.
3. With the filter and taking into account the internal resistance of the transformer's secondary winding.

The studies were conducted based on a classical three-phase asymmetric controlled bridge rectifier without a zero diode [1], whose block diagram is shown in Figure 2.

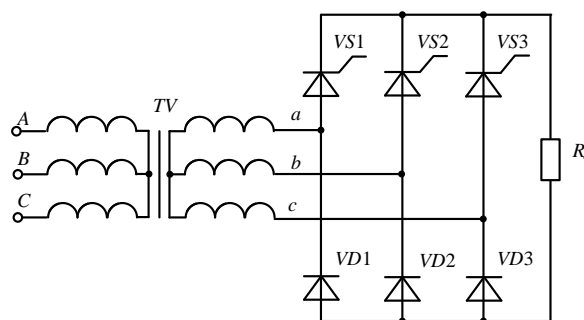


Figure 2 – Three-phase asymmetric controlled bridge rectifier

It is assumed that the rectifier is powered by a symmetrical three-phase source, with its windings connected in a star configuration, with a direct phase sequence, through a connected three-phase step-down transformer TV , where the windings maintain a star connection at the output. In the study, it is assumed that the initial phase of the phase voltage for phase A is 0° . A three-phase bridge rectifier with a resistor load R_d is connected to the network from the secondary winding of the transformer. The asymmetric three-phase bridge without a zero diode and filter

consists of three controlled valves (thyristors $VS1$, $VS2$, $VS3$), which form the cathode valve group, and three diodes ($VD1$, $VD2$, $VD3$), which form the anode valve group. Assuming an ideal transformer with leakage inductance, at any given time, two valves are in the open state: one in the cathode group (provided that control pulses are applied to them) and one in the anode group. In the cathode group, the valve in the open state is the one whose anode has the highest positive potential relative to the zero point of the transformer's secondary winding. In the anode group, the valve in the open state is the one whose cathode has the most negative potential relative to the zero point of the transformer's secondary winding. Thus, the current in the transformer's secondary windings flows twice per network voltage period in different directions.

It is assumed that u_a , u_b , u_c represents the instantaneous values of phase voltages, and i_a , i_b , i_c represents the instantaneous values of phase currents, and accordingly, the line currents.

Circuit modeling and process studies were performed in the MATLAB® and Simulink® environment [21]. For computer modeling, a typical circuit of a semi-controlled three-phase rectifier and filter was used for the three research cases mentioned above.

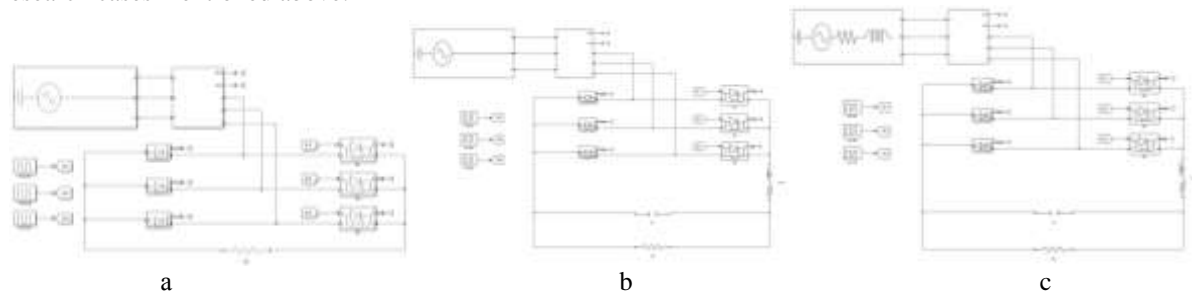


Figure 3 – Simulation model of the rectifier in the MATLAB® and Simulink® environment:
 a – without considering the filter and the internal resistance of the transformer's secondary winding;
 b – considering the filter, but without taking into account the internal resistance of the transformer's secondary winding;
 c – with the filter and taking into account the internal resistance of the transformer's secondary winding.

The following values of the model parameters were used in the calculations: the amplitude of the electromotive force (EMF) of the ideal three-phase voltage source $E_m = 26,114 \cdot \sqrt{2}$ B, the network frequency $f_{net} = 50$ H, and the resistance of the resistive load $R_d = 4 \Omega$. These parameters allow for obtaining the rectified voltage $U_d = 36$ V, which is necessary for the operation of a typical commutator electric motor used in kids quad bikes.

For the second model, the parameters of the corresponding elements remained the same. A G-shaped LC filter was added, where the inductor was connected in series with the parallel combination of the capacitor and resistive load. The filter parameters were set to the following values: $L_F = 5$ mH, $R_F = 25$ m Ω , $C_F = 1 \cdot 10^4$ μ F.

In the third model, to enable the practical use of the rectifier with the G-shaped LC filter for a resistive load, it was decided to add the internal resistance of the transformer with the following parameters: $L_a = 18,12$ mH, $R_a = 114$ m Ω .

The studies were conducted with the control angles of the thyristor switches varying from 0° to 90° in intervals of 10° . It is worth noting that when the control angle of the thyristors is $\alpha = 0^\circ$, the rectifier is symmetrical, considering the thyristors behaving as diodes, the ripple frequency of the rectified voltage (f_{ripple}) is considered to be equal to $f_{ripple} = 6 \cdot f_{net}$, for other angles, the ripple frequency is different – $f_{ripple} = 3 \cdot f_{net}$. This clarification becomes important when recording the harmonic composition data.

The oscillograms (Fig. 4) in the coordinates of the input voltage (secondary winding of the transformer) (U_g) show the family of currents of the secondary winding of the transformer for phase A (I_g), the family of time diagrams of the load voltage (U_d), and the family of time diagrams of the load currents (I_d) with the control angle (α) varying from 0° to 90° in steps of 10° . As expected, the current signal shapes are distorted in all considered cases. In the case of considering the internal resistances of the transformer, the phase voltage signal undergoes distortion.

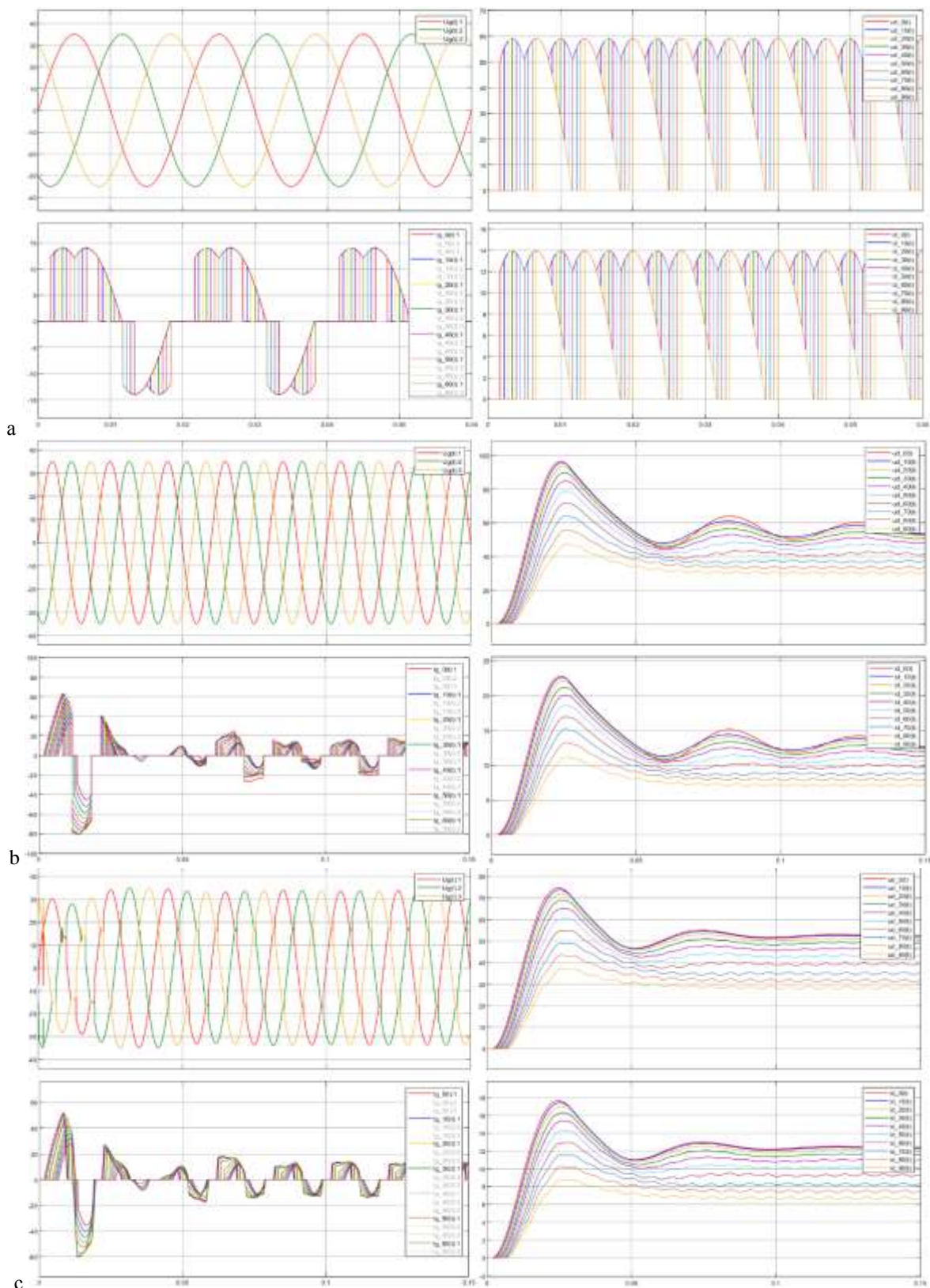


Figure 4 – Time diagrams of the network voltage (U_g), network current (I_g), load voltage (U_d), and load current (I_d) as the control angle of the thyristors (α) changes:

- a – without considering the filter and the internal resistance of the transformer's secondary winding;
- b – with the filter, but without considering the internal resistance of the transformer's secondary winding;
- c – with the filter and considering the internal resistance of the transformer's secondary winding.

The obtained simulation results, recorded in the MATLAB® and Simulink® environment, are presented in the form of graphs showing the dependence on the change in the control angle, for the root mean square value of the network phase current (Fig. 5), its total harmonic distortion (THD) normalized to a reference value (Fig. 6), active power (Fig. 7) and reactive power of the network (Fig. 8), the change in the phase shift angle between voltage and the first harmonic of the phase current (Fig. 9), and the power factor (PF) (Fig. 10), the value of the zero harmonic component of the rectified current (Fig. 11), and the rectified current ripple factor (Fig. 13).

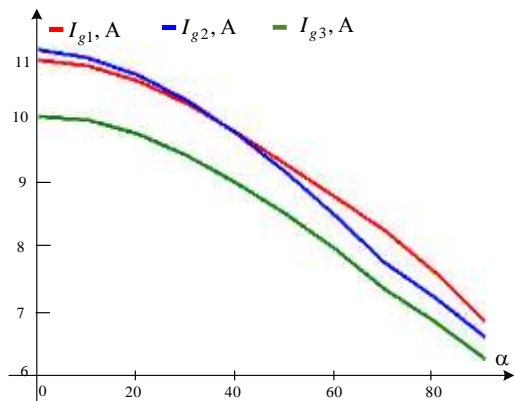


Figure 5 – Dependence of the phase current magnitude on the thyristor control angle

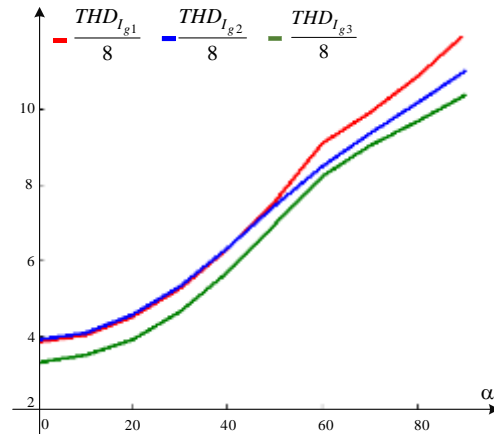


Figure 6 – Dependence of the phase current THD magnitude on the thyristor control angle

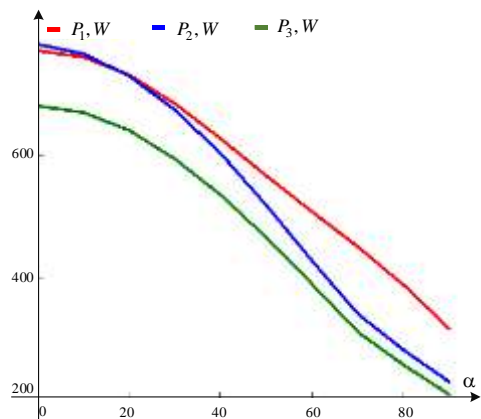


Figure 7 – Dependence of the active power magnitude of the network on the thyristor control angle

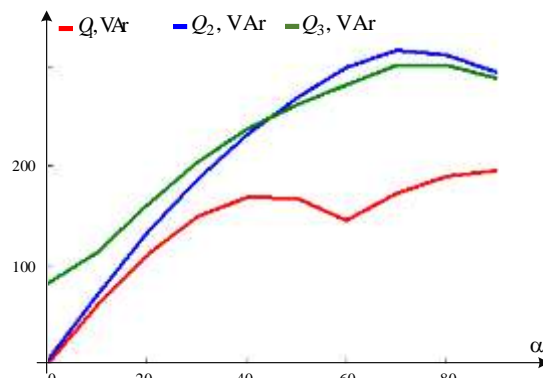


Figure 8 – Dependence of the reactive power magnitude of the network on the thyristor control angle

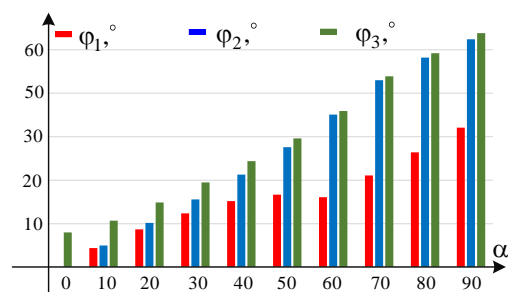


Figure 9 – Effect of the thyristor control angle on the phase shift between voltage and the first harmonic of the network current.

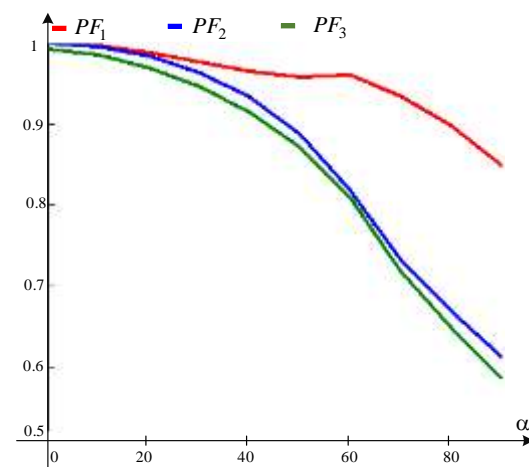


Figure 10 – Dependence of the PF value on the thyristor control angle.

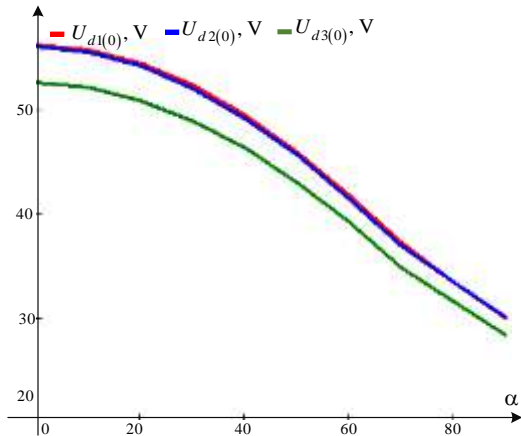


Figure 11 – Dependence of the zero harmonic value on the thyristor control angle.

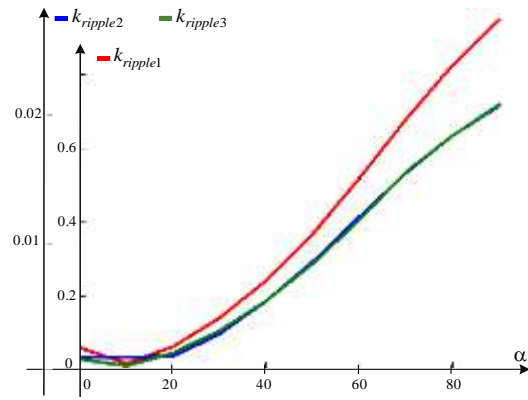


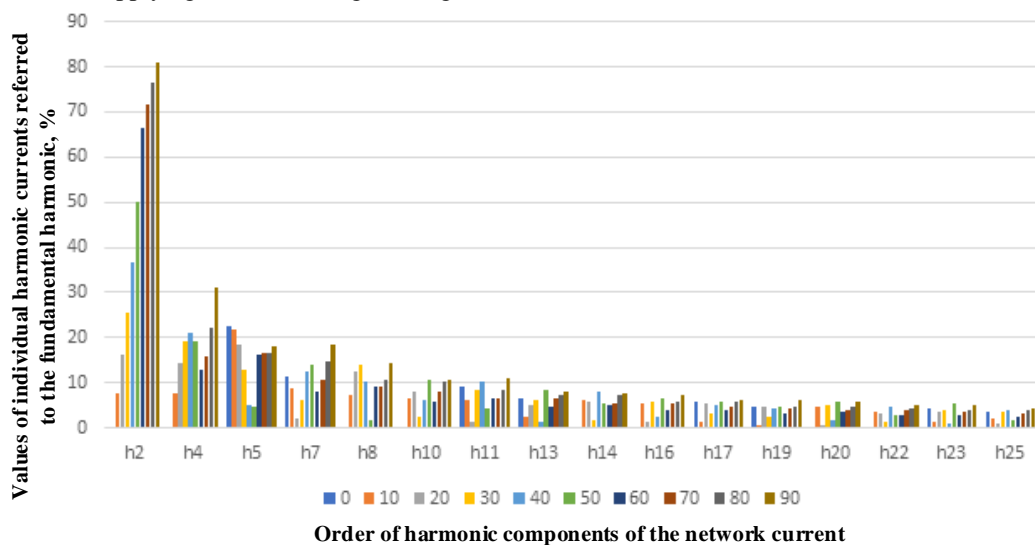
Figure 12 – Dependence of the ripple coefficient value on the thyristor control angle.

The analysis of the obtained results shows that increasing the control angle leads to a decrease in the root mean square value of the phase current and the value of the rectified voltage at the zero harmonic. At the boundary points, the reduction in the phase current is approximately 1.6 times, and the rectified voltage decreases by a factor of 1.86, with this trend being consistent for all three cases.

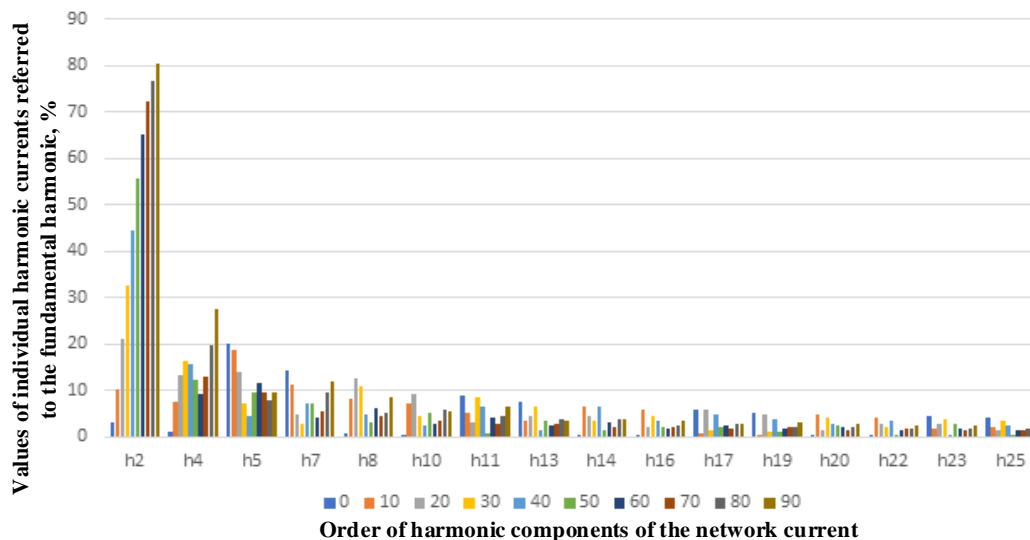
The ability to control the rectified voltage by changing the angle (α) introduces additional nonlinearity to the rectifier circuit. Thus, the shorter the conduction time of the thyristors, the more harmonics are generated, increasing the total harmonic distortion (THD) of the current. As a result, the THD of the network current (THDi) increases, exceeding the allowable value by 3.27 times at $\alpha = 30^\circ$ and by 10.365 times at $\alpha = 90^\circ$. From the graphs presented in Fig. 6, it is evident that the use of a filter helps reduce the harmonic components in the network current curve by 8-15%, depending on the thyristor control angle.

Along with the increase in nonlinearity of the rectifier circuit, an increase in the control angle leads to an increase in the phase shift angle between the phase voltage and current of the network in the fundamental harmonic component at the input of the rectifier circuit, ranging from $\varphi = 0^\circ$ to $\varphi = 32^\circ$ for the case of the circuit without a filter. The presence of the filter worsens the situation due to the increase in the phase shift angle, ranging from $\varphi = 8^\circ$ to $\varphi = 53,8^\circ$. This explains the decrease in the power factor and the increase in the generation of reactive power. At the same time, from the graphs (Fig. 10), it is evident that the use of the filter leads to a reduction in the power factor: $\alpha = 30^\circ$ the decrease is 3.15%, for $\alpha = 60^\circ$ – 15.7%, and for $\alpha = 90^\circ$ – 31%.

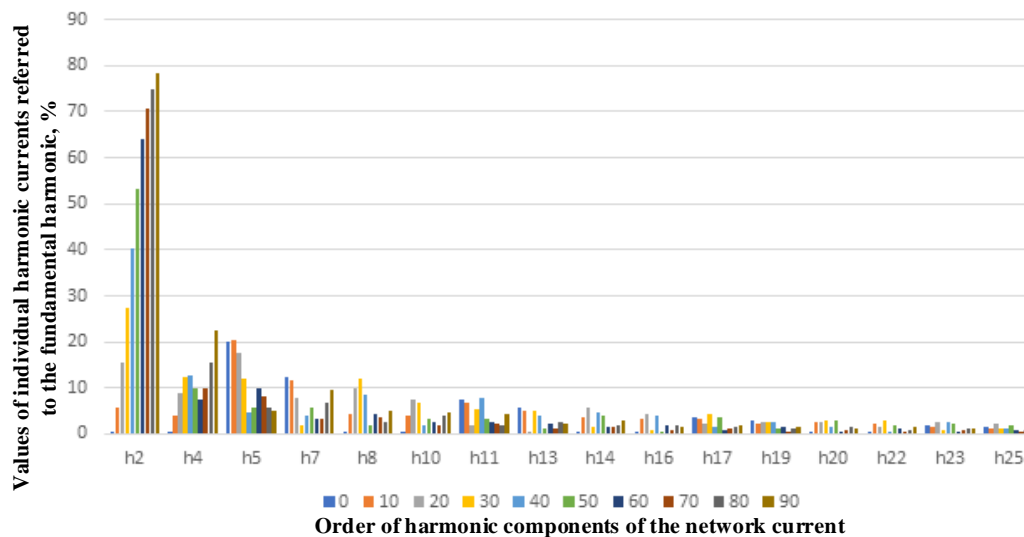
The harmonic composition of each phase current waveform was analyzed using the Fast Fourier Transform (FFT) function in MATLAB® and Simulink®. Figure 13 shows the spectral composition of the input current for three cases when applying the control angle change.



a



b



c

Figure 13 – Values of the harmonic series of the grid current as a function of the thyristor control angle, normalized to the fundamental harmonic for three simulation cases:
 a – without considering the filter and the internal resistance of the transformer’s secondary winding;
 b – with the filter considered, but without the internal resistance of the transformer’s secondary winding;
 c – with the filter and the internal resistance of the transformer’s secondary winding.

A detailed analysis of the amplitude-frequency characteristics of the phase currents was conducted for the control angles $\alpha = 0^\circ; 20^\circ; 30^\circ; 60^\circ; 70^\circ; 90^\circ$. It was established that for all control angles, the harmonic components of the grid current are observed up to the 50th harmonic. The diagrams (Fig. 13) show the amplitudes of the harmonic components of the input current normalized to the fundamental harmonic.

Conclusions.

This study analyzes the impact of thyristor rectifiers on power quality in three-phase networks. The results of the modeling conducted using the MATLAB®/Simulink® environment showed that asymmetric controlled rectifiers can cause significant harmonic distortions, leading to the total harmonic distortion (THD) exceeding the permissible limits defined by the IEEE 519-2022 and DSTU EN 50160:2023 standards.

The proposed use of LC filters to reduce the harmonic levels revealed their negative impact on the system: a decrease in the power factor and the current magnitude in the network. This highlights the need for careful filter design to ensure the optimal functioning of the power system.

Thus, the results of the study emphasize the importance of considering harmonic distortions during the design and operation of thyristor rectifiers in three-phase systems, as well as the need to implement appropriate measures to ensure proper power quality in accordance with current standards.

References

1. Ostroverkhov, M. Y., Senko, V. I., Chibelis, V. I. (2021). Industrial electronics. Semiconductor AC to DC converters: Tutorial manual [Promyslova elektronika. Napivprovodnykovi peretvoryuvachi zminnoyi napruhy v postiynu: navch. posib.]. Kyiv. Igor Sikorsky KPI: LIRA – 341 P.
2. Singh, B., Chandra, A., & Al-Haddad, K. (2015). Power Quality Problems and Mitigation Techniques. New Jersey, USA, vol. 9781118922.
3. Rüstemli, S., Okuducu, E., Almali, M. N., & Efe S. B. (2015). Reducing the effects of harmonics on the electrical power systems with passive filters. Bitlis Eren University Journal of Science and Technology, vol. 5, doi: 10.17678/beujst.57339.
4. De La Rosa, F. C. (2015). Harmonics, Power Systems and Smart Grids. 2nd ed. Boca Raton, USA: CRC Press.
5. Sarathi, R., Oza, K. H., Kumar, C. L. G. P., & Tanaka, T. (2015). Electrical treeing in XLPE cable insulation under harmonic AC voltages. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, no. 6, pp. 3177–3185, doi: 10.1109/TDEI.2015.005022.
6. Gandhare, W. Z., & Patil, K. D. (2013). Effects of harmonics on power loss in XLPE cables. Energy and Power Engineering, vol. 5, pp. 1235–1239, doi: 10.4236/epe.2013.54B234.
7. Badri, J. A., Ruiz, J.-R. R., Garcia, A., Trujillo, S., & Marzábal, A. (2024). Predicting the effect of voltage harmonic phase angle on transformer core losses. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 73, art. 6008609, doi: 10.1109/TIM.2024.3449933.
8. Lu, G., Zheng, D., Zhang, Q., & Zhang, P. (2022). Effects of converter harmonic voltages on transformer insulation ageing and an online monitoring method for interlayer insulation. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 3, pp. 3504–3514, doi: 10.1109/TPEL.2021.3118020.
9. Deokar, S. A., & Waghmare, L. M. (2011). Impact of power system harmonics on insulation failure of distribution transformer and its remedial measures. 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, Kanyakumari, India, pp. 136–140, doi: 10.1109/ICECTECH.2011.5941817.
10. Hongbo, Q., Ran, Y., Weili, L., & Nan, J. (2015). Influence of rectifiers on high-speed permanent magnet generator electromagnetic and temperature fields in distributed power generation systems. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, no. 2, pp. 655–662, doi: 10.1109/TEC.2014.2366194.
11. Barnes, R. (1989). Harmonics in power systems. Power Engineering Journal, vol. 3, no. 1, pp. 11–15.
12. Maslowski, W. A. (1993). Harmonics in power systems. Proceedings of IEEE 1993 Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference, Atlanta, GA, USA, pp. 11/1-1110, doi: 10.1109/TEXCON.1993.255776.
13. Tzeng, Y. S. (1998). Harmonic analysis of parallel-connected 12-pulse uncontrolled rectifier without an interphase transformer. IEE Proceedings – Electric Power Applications, vol. 145, no. 3, pp. 253–260.
14. Fukuda, S., Ohta, M., & Iwaji Y. (2008). An auxiliary-supply-assisted harmonic reduction scheme for 12-pulse diode rectifiers. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 3, pp. 1270–1277.
15. Jin, Y., Dong, K., & Zhao, J. (2024). Analysis of harmonic characteristics of the three-phase rectifier and the impacts on the power quality. International Conference on Electrical Technology and Automation Engineering. Journal of Physics: Conference Series 2803 (2024) 012010, doi: 10.1088/1742-6596/2803/1/012010
16. McCarty, M., Taufik, T., Pratama, A., & Anwari, M. (2009). Harmonic analysis of input current of single-phase controlled bridge rectifier. 2009 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 520–524, doi: 10.1109/ISIEA.2009.5356404.
17. Michalec, Ł., Jasiński, M., Sikorski, T., Leonowicz, Z., Jasiński, Ł., & Suresh, V. (2021). Impact of harmonic currents of nonlinear loads on power quality of a low voltage network—review and case study. Energies, vol. 14, no. 12, art. 3665, doi: 10.3390/en14123665.
18. Ojo, K., Awodele, A., & Sebitosi, A. (2019). Power quality monitoring and assessment of a typical commercial building. 2019 IEEE AFRICON, Accra, Ghana, pp. 1–6, doi: 10.1109/AFRICON46755.2019.9133970.
19. IEEE 519-2022. (2022). IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
20. DSTU EN 50160:2023. (2023). Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks [Kharakterystyky napruhy elektropostachannya v elektrychnykh merezhakh zahal'noyi pryznachenosti] (EN 50160:2022, IDT). Kyiv: DP “UkrNDNTS”.
21. MATLAB for Artificial Intelligence. URL: <https://www.mathworks.com/> (January, 31.2025).

Ю.В. Перетятко¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-1397-8078

Є. О. Троценко¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-9379-0061

М. Р. Гайко¹, студент, ORCID 0009-0003-9856-7485

В. А. Святненко¹, старший викладач, ORCID 0000-0002-0518-1045

¹Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЧАСУ ПРОВІДНОСТІ ТИРИСТОРІВ У ТРИФАЗНИХ КЕРОВАНИХ ВИПРЯМЛЯЧАХ НА ГАРМОНІЧНІ СПОТВОРЕННЯ В МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Проблематика. Сучасні технології, пов'язані із силовою електронікою та мікропроцесорами, створюють нові виклики для забезпечення високої якості електричної енергії. Використання однофазних та трифазних випрямлячів для живлення навантажень часто призводить до спотворення форми струму, що негативно впливає на ефективність роботи обладнання та знижує експлуатаційні характеристики енергетичних систем. Головною проблемою є гармонічні спотворення, спричинені нелінійністю навантажень, які можуть погіршити якість електричної енергії та вплинути на працездатність трансформаторів і кабельних ліній. **Мета дослідження.** Метою дослідження є аналіз змін показників якості електроенергії при зміні кута керування тиристорами в трифазному несиметричному керованому мостовому випрямлячі. Дослідження проводиться за допомогою аналітичного розрахунку та комп'ютерного моделювання. **Методика реалізації.** Дослідження проводились на базі імітаційної моделі трифазного мостового несиметричного випрямляча. Для цього використовувались середовище MATLAB® та Simulink®, де проводили моделювання трьох випадків: без фільтра, з фільтром, але без врахування внутрішнього опору трансформатора, а також з фільтром і врахуванням внутрішнього опору трансформатора. Моделювання включало аналіз змін параметрів при різних кутах керування тиристорами. **Результати дослідження.** Встановлено, що збільшення кута керування призводить до зростання коефіцієнта гармонічних спотворень у мережі, що може перевищувати допустимі межі, визначені стандартами IEEE 519-2022 та ДСТУ EN 50160:2023. Також досліджено вплив LC-фільтрів на якість електроенергії, зокрема їхній негативний ефект у вигляді зменшення коефіцієнта потужності. **Висновки.** Зміна кута керування тиристорами впливає на якість електричної енергії, збільшуючи гармонічні спотворення та знижуючи коефіцієнт потужності. Отримані результати підкреслюють необхідність ретельного вибору параметрів керування випрямлячами та фільтрації гармонік для забезпечення відповідності нормативним вимогам. Важливою рекомендацією є врахування внутрішніх опорів трансформаторів при проектуванні таких схем, оскільки вони впливають на рівень спотворень струму та напруги в електричній мережі.

Ключові слова: гармонічні спотворення, тиристорний випрямляч, загальний коефіцієнт гармонічних спотворень (THD), якість електроенергії, комп'ютерне моделювання

Надійшла: 14.02.2025

Received: 14.02.2025

КОМУТАЦІЙНИЙ ПРОЦЕС У ТРИФАЗНОМУ ДВОМОСТОВОМУ КОМПЕНСАЦІЙНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Наведені результати аналізу енергетичних процесів у досліджуваному компенсаційному перетворювачі при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами. Виявлено наявність трьох режимів роботи, які відрізняються закономірністю зміни струму фази конденсаторної батареї. Один із цих режимів досліджується докладно. При цьому отримано новий науковий результат. Він засвідчує, що у випадку, коли комутаційний процес у силовому електричному вентилі однієї фази, відбувається в інтервалі роботи транзистора комутуючої ланки наступної фази, величина комутуючої напруги у момент комутації не залежить від величини затримки подачі імпульсів керування на транзистори. Для підтвердження і верифікації отриманих результатів застосоване схемотехнічне моделювання у пакеті *Microworld*. Описана методика моделювання, наведені її результати, проведено аналіз результатів. Порівняльний аналіз числових значень характеристик енергетичних процесів досліджуваного перетворювача, отриманих в результаті аналітичного розрахунку і схемотехнічного моделювання, показав, що розбіжність не перевищує 4%. Це свідчить про адекватність застосованої методики моделювання і прийнятну точність результатів аналітичних розрахунків. Бібл. 6, рис. 4.

Ключові слова: конденсаторна батарея, схемотехнічна модель, комутуюча напруга, електричний вентиль, кут комутації, кут регулювання.

Вступ. Схема двомостового трифазного компенсаційного перетворювача наведена на рис. 1. Він відноситься до нового покоління пристроїв силової електроніки компенсаційного типу, створення та дослідження яких ведеться у Національному технічному університеті України «КПІ ім. Ігоря Сікорського» [1]. Живлення перетворювача здійснюється через трифазний трансформатор з двома вторинними вентильними обмотками, з'єднаними за прямою та зворотною зіркою. Перетворювач містить дві трифазні групи силових електричних вентилів компенсаційної частини (VD1 – VD3 та VD4 – VD6), дві трифазні групи силових електричних вентилів некомпенсаційної частини (VD7 – VD9 та VD10 – VD12), комутуючу ланку, яка складається з трифазної конденсаторної батареї і трифазної групи повністю керованих приладів (типів GTO, IGCT або IGBT) та навантаження R_n і L_n .

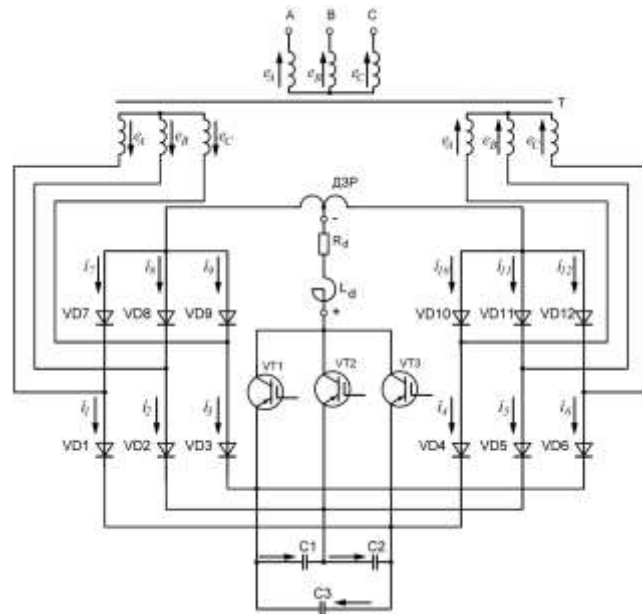


Рисунок 1 – Схема трифазного двомостового компенсаційного перетворювача

Складна схемотехнічна побудова досліджуваного перетворювача та широкі можливості щодо регулювання процесу живлення споживачів постійного струму, обумовлюють різноманіття робочих режимів та особливостей електромагнітних процесів, що їх супроводжують.

Перші результати дослідження електромагнітних процесів у трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі опубліковані в [2]. У публікації відмічалось, що перетворювач відноситься до засобів силової електроніки з конденсаторами у силових колах. Розробка і дослідження таких пристроїв проводиться як у нашій країні [3,4], так і за її межами [5,6].

У публікації [2] ставилося за мету визначення впливу керування транзисторами комутуючої ланки на закономірність зміни струму комутації силовими електричними вентилями, величину кутів регулювання і комутації, та визначення енергоефективних режимів роботи. Обсяг досліджень був обмежений режимами роботи, які забезпечувались регулювання транзисторів комутуючої ланки імпульсами подвоєної частоти. При цьому урахувалась величина випрямленого струму (струму навантаження I_d), сміність фази комутуючих конденсаторів C , індуктивність кола змінного струму L_γ умови регулювання робочого режиму транзисторами комутуючої ланки θ та т. ін.

За результатами проведених досліджень доведено, що стосовно комутаційного процесу у досліджуваному перетворювачі за схемою рис. 1, усе різноманіття робочих режимів, при подвоєній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки, підпорядковується двом узагальненим співвідношенням струму комутації i_k , які залежать від закономірності зміни струму i_C фази конденсаторної батареї в інтервалі комутації. Варіанти виразів струму фази конденсаторної батареї наведені далі:

$$i_{C(1)} = -\frac{1}{3}I_d - \frac{2}{3}i_k; \quad (1)$$

$$i_{C(2)} = I_d - \frac{2}{3}i_k. \quad (2)$$

Кожному варіанту закономірності зміни струму фази конденсаторної батареї відповідає вираз струму комутації силових електричних вентилів компенсаційної частини перетворювача. У публікації [1] наведено нормовані вирази струмів комутації. При цьому застосована наступна система базисних величин:

$$\text{базисна напруга } U_o = \sqrt{3}E_m;$$

базисний струм: $I_o = \sqrt{3}E_m / 2x_\gamma$, де x_γ - індуктивний опір фази перетворювального трансформатора, приведене до його вторинної обмотки;

$$\text{базисна частота } \omega_o = \omega = 314;$$

$$\text{базисна реактивність кола змінного струму: } x_o = \sqrt{3}E_m / 2I_d.$$

Остаточно нормований вираз струму комутації при подвоєній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки записується так:

$$i_{k*(1)} = -\frac{1}{2} + \frac{\cos(\theta - \alpha)}{x_{\gamma*}(\omega_o^2 - 1)} + \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos \alpha}{x_{\gamma*}(\omega_o^2 - 1)}\right) \cos \omega_o \theta - \frac{\sin \alpha}{\omega_o x_{\gamma*}(\omega_o^2 - 1)} \sin \omega_o \theta; \quad (3)$$

$$i_{k*(2)} = 1.5 + \frac{\cos(\theta - \alpha)}{x_{\gamma*}(\omega_o^2 - 1)} + \left(-1.5 - \frac{\cos \alpha}{x_{\gamma*}(\omega_o^2 - 1)}\right) \cos \omega_o \theta - \frac{\sin \alpha}{\omega_o x_{\gamma*}(\omega_o^2 - 1)} \sin \omega_o \theta. \quad (4)$$

Дослідження електромагнітних процесів у перетворювачі за схемою трифазного двомостового компенсаційного перетворювача, при більш високих частотах імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки, раніше не проводилося.

Мета роботи. Визначити вплив підвищеної (чотирикратної) частоти імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки на закономірність зміни струму комутації силовими електричними вентилями та величину кутів регулювання і комутації, які є основною енергетичною характеристикою компенсаційного перетворювача.

Результати досліджень. Система вхідної ЕРС трифазного перетворювального трансформатора схеми рис. 1 є стандартною трифазною системою прямого чергування фаз:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\theta + \pi / 6 + \psi); \\ e_B &= E_m \sin(\theta - \pi / 2 + \psi); \\ e_C &= E_m \sin(\theta + 5\pi / 6 + \psi), \end{aligned} \quad (5)$$

де E_m - амплітуда вторинної фазної ЕРС перетворювального трансформатора; θ - поточна змінна; ψ - початкова фаза напруги при включенні вентиля.

Комутаційний процес в анодних групах силових електричних вентилів VD7 – VD12 у поточній публікації не розглядається, оскільки він є відомим. Зазначені силові електричні вентиля працюють у

звичайному (некомпенсаційному) режимі і їх комутаційний процес відбувається точно так, як і у трифазному мостовому випрямлячі за схемою Ларіонова.

Режим роботи з випереджаючим кутом регулювання α (компенсаційний режим) мають силові електричні вентиля катодної групи VD1 – VD6. Оскільки система трифазних ЕРС перетворювального трансформатора є системою прямого чергування фаз, послідовність вступу в роботу силових електричних вентилів компенсаційної частини перетворювача буде такою: VD1 → VD2 → VD3 та VD4 → VD5 → VD6. Між моментами вступу в роботу зазначених трійок силових електричних вентилів має місце зсув за фазою, що дорівнює половині періоду, відповідно до схеми з'єднання вентильних обмоток.

Як зазначено у меті роботи, у публікації представлені результати дослідження режимів роботи перетворювача при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки. Це також відповідає прямому чергуванню фаз. Відповідно, послідовність вступу в роботу транзисторів комутуючої ланки VT1 → VT2 → VT3.

Аналіз енергетичних процесів у досліджуваному компенсаційному перетворювачі з урахуванням алгоритму комутації силових електричних вентилів та транзисторів комутуючої ланки при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами, також свідчить про широкий спектр їх особливостей, пов'язаних зі застосуванням зміни моменту подачі імпульсів керування на транзистори. У роботі здійснено графічну побудову кривих струму фази конденсаторної батареї для усіх можливих режимів роботи з урахуванням усіх викладених вище факторів. Проведене графічне дослідження виявило наявність трьох режимів роботи, які відрізняються закономірністю зміни струму фази конденсаторної батареї. Один із цих режимів, який досліджувався першим, характеризувався тим, що комутаційний процес у силовому електричному вентилі VD1 відбувався в інтервалі часу, протягом якого працював транзистор комутуючої ланки VT2.

Але це не основна характеристика досліджуваного режиму роботи. Більш важливим для енергетичного процесу є те, що в інтервалі роботи силового електричного вентиля VD1 транзистор тієї ж фази VT1 вступає в роботу лише один раз. Це впливає з того, що протяжність роботи силового електричного вентиля складає $(2\pi/3 + \gamma)$, а імпульс керування транзисторами комутуючої ланки при чотирикратній частоті має протяжність $\pi/6$. Тож забезпечити досліджуваний режим роботи перетворювача можливо лише за рахунок певного інтервалу зсуву імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки. Тому отримана графічно закономірність зміни половини періоду струму фази конденсаторної батареї представлена на рис. 2 у вигляді трьох графіків. Графічна побудова здійснена якісно, без урахування величини випереджаючого кута регулювання силових електричних вентилів компенсаційної частини перетворювача.

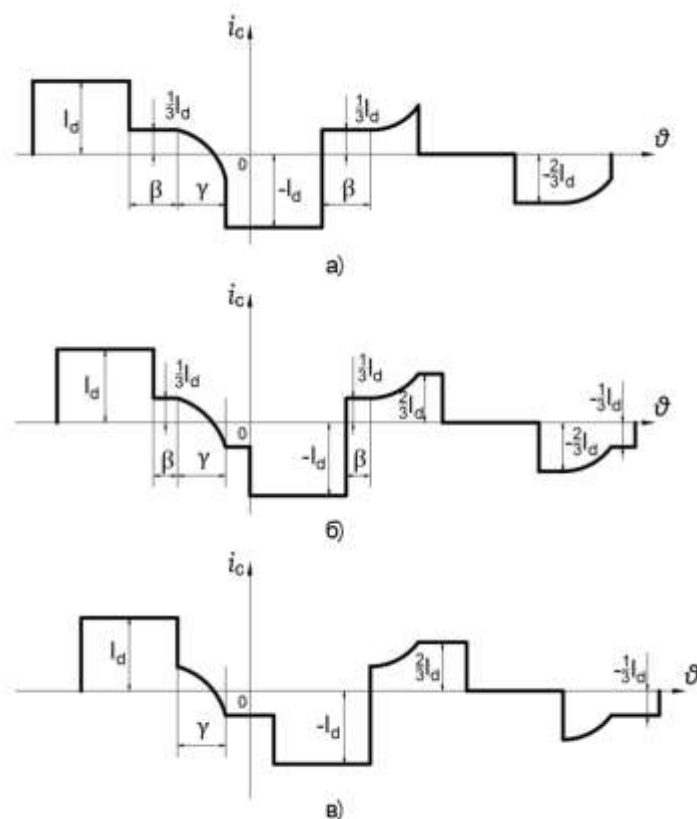


Рисунок 2 – Форма струму фази конденсаторної батареї

Рис. 2,а відповідає випадку, коли початок комутації силового електричного вентиля VD1 починається в інтервалі роботи VT2, а закінчується – коли VT2 виходить з роботи.

Рис. 2,б відповідає випадку, коли комутація силового електричного вентиля VD1 починається і закінчується в інтервалі роботи VT2. Тож принагідно відмітимо, що усі викладені вище міркування стосуються лише таких режимів роботи перетворювача, при яких кут комутації силових електричних вентилів його компенсаційної частини не перевищує $\pi/6$.

Рис. 2,в відповідає випадку, коли початок комутації силового електричного вентиля VD1 збігається з моментом вступу в роботу транзистора VT2.

Але у всіх зазначених вище випадках, в інтервалі комутації струм фази конденсаторної батареї змінюється за законом

$$i_{c(1)} = \frac{1}{3}I_d - \frac{2}{3}i_k. \quad (6)$$

Для подальшого дослідження скористаємось методикою, яка застосовувалась у [2]. Там наведене універсальне рівняння комутації струму силовими електричними вентилями будь-якого перетворювача компенсаційного типу:

$$2x_\gamma \frac{di_k}{d\vartheta} - u_c = \sqrt{3}E_m \sin(\vartheta + \psi). \quad (7)$$

$$\text{де } u_c = \frac{1}{\omega C} \int_0^\vartheta i_c d\vartheta + u_c(0). \quad (8)$$

Здійснивши спільний розв'язок (6), (7) і (8), отримаємо наступне рівняння для контуру комутації з:

$$2x_\gamma \frac{di_k}{d\vartheta} + \frac{1}{\omega C} \int_0^\vartheta \left(\frac{2}{3}i_k - \frac{1}{3}I_d\right) d\vartheta - u_c(0) = \sqrt{3}E_m \sin(\vartheta + \psi). \quad (9)$$

Диференціюємо останнє і отримаємо:

$$2\omega L_\gamma \frac{d^2 i_k}{d\vartheta^2} + \frac{2i_k}{3\omega C} - \frac{I_d}{3\omega C} = \sqrt{3}E_m \cos(\vartheta + \psi)$$

чи

$$2\omega L_\gamma \frac{d^2 i_k}{d\vartheta^2} + \frac{2i_k}{3\omega C} = \sqrt{3}E_m \cos(\vartheta + \psi) + \frac{I_d}{3\omega C}.$$

Звернімо увагу, що останнє диференціальне рівняння відрізняється від наведеного у [2] лише знаком другого доданку правої частини. Тож його вирішення щодо закономірності зміни струму комутації також буде складатися з двох вимушених складових та однієї вільної:

$$i_k = i_{k1} + i_{k2} + i_k''. \quad (10)$$

Вільна і одна з вимушених складових будуть такими ж, як і у [2], а інша вимушена буде такою ж за величиною, але протилежною за знаком. Остаточну закономірність зміни струму комутації у загальному вигляді запишемо наступним чином:

$$i_k = \frac{1}{2}I_d + \frac{\sqrt{3}E_m \cos(\vartheta - \alpha)}{2/3\omega C - 2\omega L_\gamma} + K_1 \cos \frac{\omega_0}{\omega} \vartheta + K_2 \sin \frac{\omega_0}{\omega} \vartheta. \quad (11)$$

Сталі інтегрування отримаємо, виходячи з наступних міркувань. У момент початку комутації при $\vartheta = 0$, струм комутації $i_k = 0$, та урахувавши той факт, що комутація струму починається в момент, коли лінійна напруга вторинної обмотки перетворювального трансформатора зрівняється за величиною з комутуючою напругою фази конденсаторної батареї, включеної між комутуючими вентилями, і різниця зазначених напруг при цьому дорівнюватиме нулю.

Застосувавши також наведену вище систему базисних величин, отримаємо остаточний нормований вираз струму комутації силових електричних вентилів при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки у досліджуваному режимі роботи компенсаційного перетворювача:

$$i_{k*(1)} = \frac{1}{2} + \frac{\cos(\vartheta - \alpha)}{x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)} - \left(\frac{1}{2} + \frac{\cos \alpha}{x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)}\right) \cos \omega_{0*} \vartheta - \frac{\sin \alpha}{\omega_{0*} x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)} \sin \omega_{0*} \vartheta. \quad (12)$$

Ту ж саму систему базисних величин застосуємо щодо отримання нормованого виразу комутуючої напруги при з'єднанні конденсаторної батареї трикутником:

$$u_{c\Delta*} = \frac{3}{2} x_{\gamma*} \omega_{0*}^2 \int_0^\vartheta i_{k*} d\vartheta + u_{c*}(0). \quad (13)$$

Спільний розв'язок (13), (12) та (6) дає змогу отримати закономірність зміни комутуючої напруги у досліджуваному режимі роботи перетворювача. Розрахунок проведено за окремими інтервалами:

I інтервал: $i_{C^*} = \frac{1}{3} - \frac{2}{3}i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma$;

$$u_{C\Delta^*(1)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^\vartheta i_{C^*} d\vartheta + u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(\frac{\vartheta}{2} - \int_0^\vartheta i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma$, $u_{C\Delta^*(1)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(\frac{\gamma}{2} - \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$.

II інтервал: $i_{C^*} = -1/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma - \beta)$;

$$u_{C\Delta^*(2)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^\vartheta i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(1)k} = -x_{\gamma^*}\omega_0^2 \frac{\vartheta}{2} + x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(\frac{\gamma}{2} - \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma - \beta)$, $u_{C\Delta^*(2)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{12} + \gamma - \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta + \beta/2 \right) + u_{C^*}(0)$.

III інтервал: $i_{C^*} = -1$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C\Delta^*(3)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^\vartheta i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(2)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{3\vartheta}{2} \right) + x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{12} + \gamma - \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta + \beta/2 \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6$, $u_{C\Delta^*(3)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \gamma - \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta + \beta/2 \right) + u_{C^*}(0)$.

IV інтервал: $i_{C^*} = \frac{1}{3}$, $0 \leq \vartheta \leq \beta$;

$$u_{C\Delta^*(4)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^\vartheta i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(3)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(\frac{\vartheta}{2} \right) + x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \gamma - \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta + \beta/2 \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \beta$, $u_{C\Delta^*(4)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \gamma - \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta + \beta \right) + u_{C^*}(0)$.

V інтервал: $i_{C^*} = \frac{1}{3} + \frac{1}{3}i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma$;

$$u_{C\Delta^*(5)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^\vartheta i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(4)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(\frac{\vartheta}{2} + \frac{1}{2} \int_0^\vartheta i_{k^*} d\vartheta \right) + x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \gamma - \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta + \beta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma$, $u_{C\Delta^*(5)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \frac{3\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta + \beta \right) + u_{C^*}(0)$.

VI інтервал: $i_{C^*} = 2/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma - \beta)$;

$$u_{C\Delta^*(6)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^\vartheta i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(5)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \vartheta + x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \frac{3\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta + \beta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma - \beta)$, $u_{C\Delta^*(6)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$.

VII інтервал: $i_{C^*} = 0$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C\Delta^*(7)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^\vartheta i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(6)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0) = u_{C\Delta^*(7)k}.$$

VIII інтервал: $i_{C^*} = -2/3$, $0 \leq \vartheta \leq \beta$;

$$u_{C\Delta^*(8)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^\vartheta i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(7)k} = -x_{\gamma^*}\omega_0^2 \vartheta + x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \beta$, $u_{C\Delta^*(8)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^\gamma i_{k^*} d\vartheta - \beta \right) + u_{C^*}(0)$.

IX інтервал: $i_{C^*} = -\frac{2}{3} + \frac{1}{3}i_{k^*}$, $0 \leq \vartheta \leq \gamma$;

$$u_{C\Delta^*(9)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(8)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\vartheta + \frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta\right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma$, $u_{C\Delta^*(9)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{6} - \frac{\gamma}{2} - \beta\right) + u_{C^*}(0)$.

X інтервал: $i_{C^*} = -1/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma - \beta)$;

$$u_{C\Delta^*(10)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(9)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\vartheta}{2}\right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{6} - \frac{\gamma}{2} - \beta\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma - \beta)$, $u_{C\Delta^*(10)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}\right) + u_{C^*}(0)$.

XI інтервал: $i_{C^*} = 1$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C\Delta^*(11)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(10)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{3}{2} \vartheta\right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6$, $u_{C\Delta^*(11)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\beta}{2}\right) + u_{C^*}(0)$.

XII інтервал: $i_{C^*} = \frac{1}{3}$, $0 \leq \vartheta \leq \beta$;

$$u_{C\Delta^*(12)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(11)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \frac{\vartheta}{2} + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\beta}{2}\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \beta$, $u_{C\Delta^*(12)k} = u_{C^*}(0)$.

Визначимо початкове значення комутуючої напруги, виходячи з умови, що крива комутуючої напруги, не має постійної складової, тобто, її середнє значення за період дорівнює нулю. Виконавши розрахунок, подробиці якого тут не наведено, отримаємо:

$$u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\gamma}{2} + \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta\right). \quad (14)$$

Отриманий результат є неочікуваним, чи непередбачуваним. Зі співвідношення (14) випливає, що у випадку, коли комутаційний процес у силовому електричному вентилі однієї фази, відбувається в інтервалі роботи транзистора комутуючої ланки наступної фази, величина комутуючої напруги у момент комутації не залежить від величини β . Зміна цієї величини при регулюванні робочого режиму роботи перетворювача здійснюється регулюванням моменту подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки.

Це новий науковий результат, оскільки іншими дослідженнями компенсаційних перетворювачів нового покоління подібних властивостей не було виявлено. Разом з тим, зміна форми кривої комутуючої напруги при зміні моменту подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки, результатами досліджень, представленими у поточній публікації, підтверджується. Досить звернути увагу на закономірність зміни кривої комутуючої напруги на окремих інтервалах, представлених вище. Як бачимо, у всі вираз входить величина β .

Будь-який новий науковий результат потребує підтвердження і верифікації. Змодельовано у системі схемотехнічного моделювання Micro Cap 12 усі три випадки, досліджені аналітично у першій половині публікації. Відповідно до схеми рис. 1 досліджуваного трифазного двомостового компенсаційного перетворювача, на рис. 3 наведена його схемотехнічна модель, на якій зазначені параметри елементів моделі і струми її віток.

Складові моделі досліджуваного компенсаційного перетворювача.

1. Перетворювальний трифазний трансформатор. Ним моделюється трифазна система ЕРС прямого чергування фаз:

$$\begin{aligned} e_A &= 57.8 \sin(\vartheta + 0.523); \\ e_B &= 57.8 \sin(\vartheta - 1.57); \\ e_C &= 57.8 \sin(\vartheta + 2.618). \end{aligned} \quad (15)$$

Методика дослідження основного питання публікації полягає у наступному. Установлюються параметри елементів моделі, відповідно даних робочого режиму, що моделюється. Результати моделювання представляються у графічній формі і необхідні для аналізу дані роздруковуються. З аналізу даних моделювання робиться висновок щодо питання, яке досліджується.

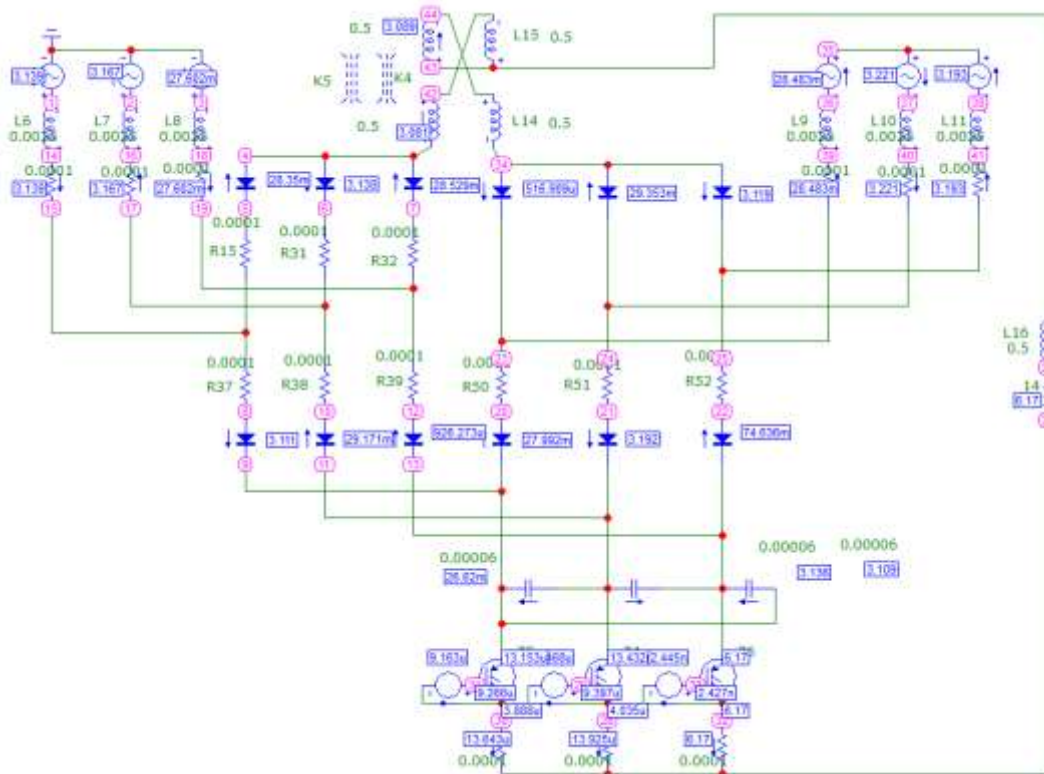


Рисунок 3 – Схематехнічна модель трифазного двомостового компенсаційного перетворювача

Як бачимо, амплітудне значення фазної ЕРС трансформатора дорівнює 57.8 В.

Приведене значення індуктивності кола змінного струму по фазам моделюється елементами L6, L7, L8, L9, L10, L11, числові значення яких однакове і дорівнює 0.0025 Гн.

2. Чотири трифазні групи силових електричних вентилів. Усі вони є діодами типу MPN3700. Їх характеристика запозичена з бібліотеки компонентів.

3. Трифазна конденсаторна батарея. Ємність усіх фаз батареї (C) однакова. У базовому режимі роботи дорівнює 0.00006 Ф.

4. Трифазна група транзисторів IGBT. У моделі використана характеристика транзисторів IGBT з бібліотеки компонентів типу IXGT40N60C2.

5. Джерела для формування імпульсів керування. Ці джерела застосовуються для формування імпульсів керування IGBT комутуючої ланки. Вони реалізовані компонентом «PULSE SOURCE» і генерують імпульси практично прямокутної форми з амплітудою 10 В.

6. Двофазний зрівноважувальний реактор. Моделюється чотирма індуктивностями по 0.5 Гн зі зв'язком між ними K4 та K5 по 0.99 Гн.

7. Коло навантаження моделі. Складається з активного опору величиною 14 Ом і згладжуючого дроселя індуктивністю 0.5 Гн.

Змодельовано усі три випадки робочого режиму. За зазначених числових даних цього режиму, наведених вище, власна частота контуру комутації згідно [2], складає:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3L_\gamma C}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0.0025 \cdot 0.00006}} = 1490.7 \text{ рад}.$$

Нормоване значення цієї частоти $\omega_{0*} = 1490.7 / 314 = 4.75$.

Також урахуємо, що базисний струм розраховується як $I_\sigma = \sqrt{3}E_m / 2x_\gamma$, де x_γ - індуктивний опір фази перетворювального трансформатора, приведене до його вторинної обмотки, то його числове значення у моделі трифазного двомостового компенсаційного перетворювача складає $I_\sigma = 100 / 1.57 = 63.69 \text{ А}$.

Комутуюча напруга є найважливішою характеристикою електромагнітного і енергетичного процесу компенсаційного перетворювача електричної енергії. Її величина і форма залежить від низки факторів: величини випрямленого струму перетворювача, ємності фази комутуючих конденсаторів та моменту подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки. Точніше, від величини затримки Θ подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки. Тому крива комутуючої напруги входить до

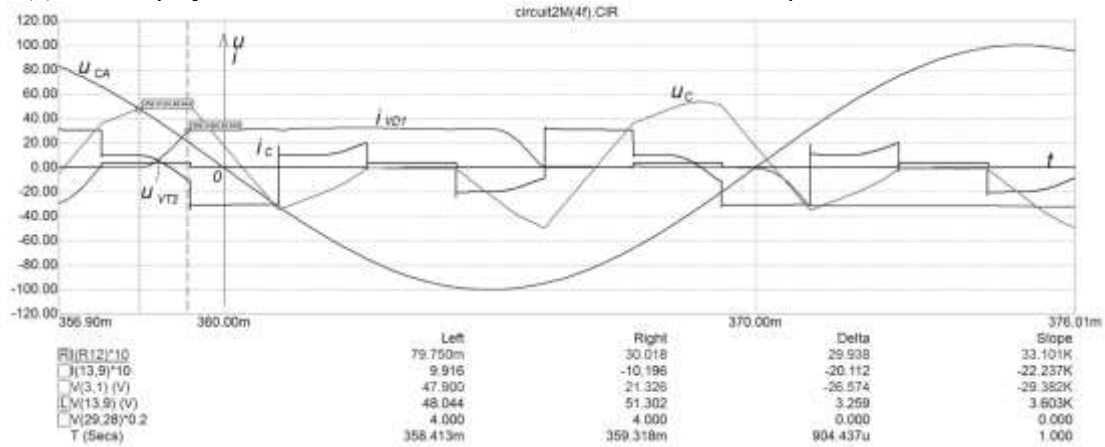
переліку тих характеристик, які мають бути відображеними у результатах моделювання досліджуваних у роботі випадках робочого режиму компенсаційного перетворювача.

Окрім кривої комутуючої напруги, для аналізу потрібно мати криву струму фази конденсаторної батареї, для підтвердження результатів її графічної побудови, наведеної на рис. 2.

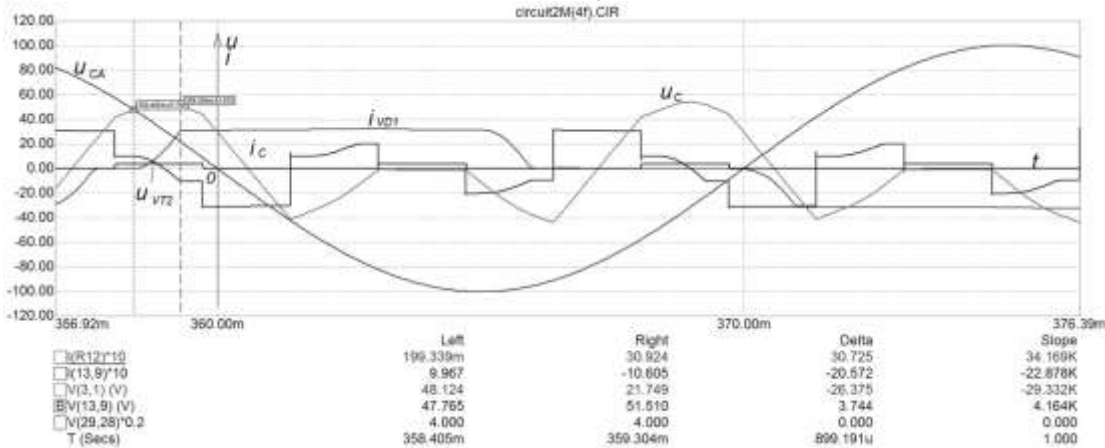
У публікації, за момент початку відліку при аналізі електромагнітних процесів, прийнято момент переходу лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора через нульове значення. Тому у роздруківці кінцевого результату схемотехнічного моделювання, має бути крива u_{cA} .

Наявність у роздруківці напруги на транзисторі комутуючої ланки u_{VT2} і струму силового електричного вентиля i_{VD1} потрібна для інформації щодо величини випереджаючого кута регулювання α , кута комутації γ та проміжку часу, протягом якого відбувається комутація.

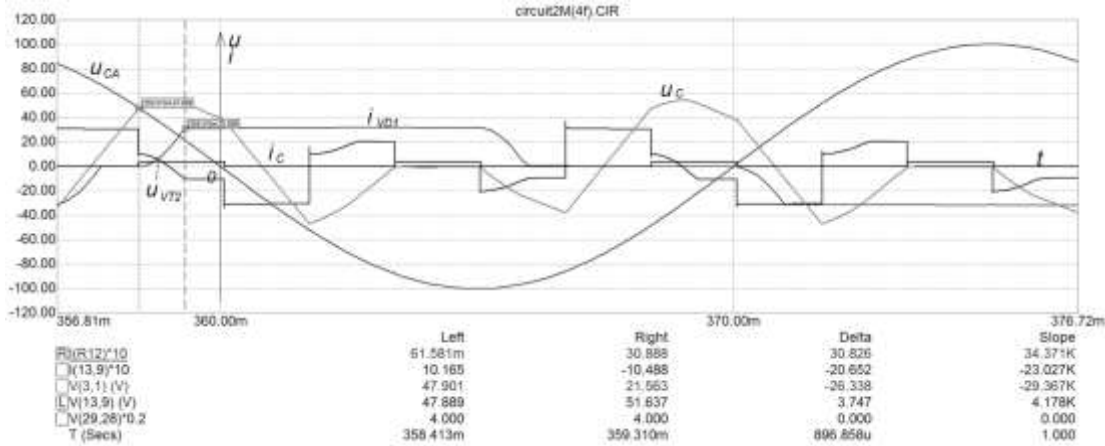
Дані щодо результатів схемотехнічного моделювання наведені на рис. 4.



a)



б)



в)

Рисунок 4 – Результати моделювання

На рис. 4 ліва суцільна вертикальна лінія позначає момент початку комутаційного процесу. У цей момент лінійна напруга вторинної обмотки перетворювального трансформатора зрівнюється з комутуючою напругою.

Числові дані режимів роботи перетворювача, які моделюються, знаходяться у колонках даних під Left та Right. Відлік часу здійснюється у мілісекундах. Значення цього моменту – нижній рядок T(Secs) колонки даних. Інші числові дані:

R(12)*10 – величина струму силового електричного вентиля VD1 (A), помножена на 10;

I(13,9)(V)*10 – струм фази конденсаторної батареї (A);

V(3,1)(V) – лінійна напруга u_{CA} вторинної обмотки трансформатора(B);

V(13,9)(V) – величина комутуючої напруги конденсаторів u_C (B);

V(29,28)(V) – імпульс керування транзистором VT2 комутуючої ланки.

На рис. 4 ліва суцільна вертикальна лінія позначає момент початку комутаційного процесу. Для усіх досліджених у роботі варіантів цей момент дорівнює 358,4 мс. У цей момент лінійна напруга вторинної обмотки перетворювального трансформатора зрівнюється з комутуючою напругою, яка дорівнює практично 48 В. Отриманий результат підтверджує висновок, який випливає із співвідношення (14), про те, що початкове значення комутуючої напруги не залежить від β .

У кінці комутаційного процесу струм комутації досягає свого максимального значення. Цей момент часу позначений правою пунктирною вертикальною лінією. Числова характеристика моменту знаходиться під Right і для усіх досліджених у роботі варіантів дорівнює 358,4 мс. Різниця часу Delta складає 0.9 мс. Ураховавши, що одній мілісекунді на рис.4 відповідають 18^0 , розрахуємо кут комутації електричних вентилів катодної частини досліджуваного перетворювача: $\gamma = 0.9 \cdot 18 = 16.2^0$.

Виходить, що від β не залежить не лише початкове значення комутуючої напруги, а й кут комутації γ . Принагідно також зазначимо, що у компенсаційних перетворювачах $u_{C*}(0) = \sin \alpha$. Оскільки у досліджуваних варіантах робочого режиму двомостового компенсаційного перетворювача початкове значення комутуючої напруги однакове і є відомим, розрахуємо випереджаючий кут регулювання:

$$\alpha = \arcsin[u_{C*}(0)] = \arcsin(0.48) = 28.7^0.$$

Цю ж характеристику електромагнітного процесу можна розрахувати і іншим шляхом, виходячи з наступних міркувань. На рис. 4 момент $t = 0$ є точкою початку природної комутації. Вона відповідає 360.0 мс на роздруківках рис. 4. Як зазначено вище, у досліджуваному компенсаційному перетворювачі комутація у силовому електричному вентилі VD1 починається у момент часу 358.4 мс, тобто на 1.6 мс раніше точки природної комутації. Ураховавши, що одній мілісекунді на рис.4 відповідають 18^0 , випереджаючий кут регулювання $\alpha = 1.6 \cdot 18 = 28.8^0$. Отриманий результат збігається з попереднім розрахунком.

Здійснимо верифікацію отриманих вище числових характеристик енергетичного процесу досліджуваного перетворювача. Використаємо нормований вираз струму комутації силових електричних вентилів (12) при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки у досліджуваному режимі роботи компенсаційного перетворювача. При цьому ураховуємо, що в кінці комутаційного процесу, при $\mathcal{S} = \gamma$, числове значення виразу (12) має дорівнювати 1. Перевіримо.

$$i_{k*(1)} = \frac{1}{2} + \frac{0.9763}{1.0416} - \left(\frac{1}{2} + \frac{0.8772}{1.0416}\right)0.2265 - \frac{0.4799}{4.9449}0.9740 = 1.0388. \quad (16)$$

Як бачимо, похибка розрахунку не перевищує 4%, що є цілком прийнятним, ураховуючи застосовану методику верифікації.

Висновки. З наведеного у публікації аналізу енергетичних процесів у досліджуваному трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі, з урахуванням алгоритму комутації силових електричних вентилів та транзисторів комутуючої ланки при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами, випливають наступні висновки:

- коли комутаційний процес у силовому електричному вентилі однієї фази, відбувається в інтервалі роботи транзистора комутуючої ланки наступної фази, величина комутуючої напруги у момент комутації не залежить від величини β , яка фактично є показником затримки подачі імпульсів керування на транзистори;

- попередній висновок також свідчить про те, що незалежними від величини затримки є основні характеристики енергетичного процесу перетворювача, а саме: випереджаючий кут регулювання і кут комутації силових електричних вентилів компенсаційної частини перетворювача;

- у досліджуваному режимі розбіжність між результатами аналітичного розрахунку та схемотехнічного моделювання основних енергетичних характеристик перетворювача, не перевищує 4%, тобто, застосована методику аналізу роботи компенсаційного перетворювача шляхом схемотехнічного моделювання є адекватною і цілком прийнятною.

Список використаної літератури

1. Бойко В.С. Трифазний двомостовий компенсаційний перетворювач паралельного типу. Патент України на корисну модель № 147874, 2021.
2. Бойко, В. 2024. Комутуюча напруга трифазного двомостового компенсаційного перетворювача. Технічна електродинаміка. 3 (Трав 2024), 025. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2024.03.025>. с.25-35.
3. Butkevych O., Chyzenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A study of transitional modes of the electric network with the powerful electromechanical load and FACTS. IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2019, p. 261-266, <http://dx.doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>.
4. Буткевич О.Ф., Чиженко О.І., Попович О.М., Трач І.В., Вплив FACTS на режим електричної мережі за прямого пуску потужної асинхронної машини у складі комплексного навантаження. Технічна електродинаміка. 2018. №6. С. 62-68.
5. David Trainer, Alvaston (GB); Ruchira Withanage, Stafford (GB); Robert Whitehouse, Stafford (GB); Andrew Cross, Great Haywood (GB). Multilevel voltage source converter. Patent No.: US 8,879,291 B2, 2014.
6. Gan Wei; Ji Hongchao; Yang Xingwu. A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function. 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 30 March 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066073>.

V. Boiko¹, Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-1018-0642

O. Shkardun¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-7980-8114

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**COMMUTATING PROCESS IN A THREE-PHASE TWO-BRIDGE
COMPENSATION CONVERTER**

The article presents the results of the analysis of energy processes in the studied compensating converter at a four-fold frequency of transistor control pulses. The presence of three operating modes differing in the pattern of change in the phase current of the capacitor battery is revealed. One of these modes is studied in detail. A new scientific result is obtained. It shows that in the case when the commutating process in the power electric valve of one phase occurs in the operating interval of the transistor of the commutating link of the next phase, the value of the commutating voltage at the moment of commutating does not depend on the delay in supplying control pulses to the transistors. To confirm and verify the obtained results, circuit simulation in the Micro Cap package is used. The modeling technique is described, its results are presented, and the results are analyzed. A comparative analysis of the numerical values of the characteristics of the energy processes of the studied converter obtained as a result of analytical calculation and circuit simulation showed that the discrepancy does not exceed 4%. This indicates the adequacy of the applied modeling technique and acceptable accuracy of the results of analytical calculations. Refer. 6, fig. 4.

Keywords: capacitor battery, circuit model, commutating voltage, electric valve, commutating angle, regulation angle.

References

1. Boiko V.S. Three-phase double-bridge parallel type compensation converter: Patent UA for utility model № 147874, 2021. (Ukr).
2. Boiko, V. 2024. Commutating voltage of the three-phase double-bridge compensating converter. Tekhnichna Elektrodynamika. 3 (May, 2024), 025. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2024.03.025>. с.25-35.
3. Butkevych O., Chyzenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A study of transitional modes of the electric network with the powerful electromechanical load and FACTS. IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2019, p. p. 261-266, <http://dx.doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>. (Ukr).
4. Butkevych O.F., Chyzenko O.I., Popovych O.M., Trach I.V., Influence of FACTS on the electric network mode during direct start of a powerful asynchronous machine as part of a complex load. Tekhnichna Elektrodynamika. 2018. No 6. pp. 62-68.
5. David Trainer, Alvaston (GB); Ruchira Withanage, Stafford (GB); Robert Whitehouse, Stafford (GB); Andrew Cross, Great Haywood (GB). Multilevel voltage source converter. Patent No.: US 8,879,291 B2, 2014.
6. Gan Wei; Ji Hongchao; Yang Xingwu. A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function. 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 30 March 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066073>.

Надійшла: 27.01.2025

Received: 27.01.2025

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ ГАРМОНІЧНИХ СПОТВОРЕНЬ ТА ТЕПЛОВИХ ВТРАТ ІНВЕРТОРА ПРИ ФОРМУВАННІ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

Підвищення ефективності систем візуалізації для виконання завдань в умовах сучасних бойових дій є можливим при адекватній ситуаційній обізнаності завдяки використанню технологій автоматичного виявлення загроз. Важливим аспектом розробки таких систем візуалізації є дослідження впливу частоти ШІМ інвертора на якість формування його вихідної напруги. Внаслідок комутаційних процесів силових елементів інвертора виникають спотворення заданого гармонічного сигналу. Крім того, як відомо, цей процес, також, супроводжується тепловими втратами. Тому дослідження ступеню впливу спотворень гармонічного сигналу та теплових втрат на енергоефективність функціонування електротехнологічного комплексу візуалізації в залежності від частоти ШІМ є актуальними. Для кількісної оцінки ступеню впливу цих факторів проведено дослідження функціонування розробленої конструкції двошарової друкованої плати. Вибір і розташування елементів плати виконувався відповідно до технічних вимог з урахуванням умови щодо забезпечення у компактній конструкції таких пристроїв мінімізації електромагнітних перешкод. Розробка плати та дослідження її функціонування проводились з використанням програмного середовища Proteus. При розробці друкованої плати передбачено схемне рішення щодо згладжування можливої появи високочастотних коливань і короткочасних піків струму при підключенні силової частини інвертора до блоку живлення постійного струму. Для генерації сигналів керування драйверами затворів IR2104 силових MOSFET-транзисторів інвертора обрано мікроконтролер ATmega128-16AU. Результати досліджень свідчать про те, що при збільшенні частоти ШІМ інвертора відбувається зменшення гармонічних спотворень. вигляд цієї залежності має гіперболічний характер. У той же час підвищення частоти ШІМ призводить до збільшення теплових втрат.

Ключові слова: система візуалізації, комутація, інвертор, частота, широтно-імпульсна модуляція, система керування положенням, енергоефективність.

Актуальність. Як відомо, при формуванні вихідної напруги інвертора виникають спотворення заданого гармонічного сигналу. Крім того, процес комутації силових елементів супроводжується утворенням теплових втрат. Обидва ці фактори необхідно враховувати при виборі “компромісного” діапазону частоти ШІМ інвертора. Тому дослідження характеру гармонічних спотворень та теплових втрат на енергоефективність роботи інвертора в залежності від частоти ШІМ є актуальними.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасних дослідженнях, присвячених широтно-імпульсній модуляції (ШІМ) для керування перетворювачами напруги, значна увага приділяється вибору ефективної частоти модуляції. Основними елементами аналізу є гармонічні спотворення, енергетичні втрати у силових ключах та електромагнітна сумісність (ЕМС) системи. Зокрема, у роботі [1] розглядаються вплив частоти ШІМ на якість вихідної напруги та рівень гармонічних спотворень. Дослідження показують, що збільшення частоти модуляції зменшує рівень нижчих гармонік, проте може призводити до зростання втрат у силових елементах перетворювача через часті перемикання. У роботі [2] проведено аналіз впливу гармонічних спотворень на функціонування електричних машин, що отримують живлення від інверторних перетворювачів. Дослідження вказують на необхідність балансу між частотою ШІМ інвертора та якістю сформованої напруги, оскільки надмірне зростання частоти може спричинити збільшення паразитних струмів у двигуні та перегрів обмоток. Таким чином, аналіз останніх досліджень вказує на необхідність комплексної оцінки щодо вибору ефективного діапазону частот ШІМ перетворювачів.

Мета дослідження. Показники вихідної напруги інверторів визначають енергоефективність їх застосування для живлення електродвигунів. В свою чергу цей показник залежить від частоти ШІМ інвертора. Метою досліджень є визначення “компромісного” діапазону частот ШІМ інвертора при формуванні його вихідної напруги. Для досягнення мети досліджень необхідно розробити апаратну частину інвертора та провести дослідження залежності впливу спотворень заданого гармонічного сигналу та очікуваних теплових втрат від частоти ШІМ щодо оцінки енергоефективності його використання.

Матеріали та методи дослідження. Матеріалом для виконання досліджень є створена віртуальна модель інвертора у програмному середовищі Proteus. Елементами моделі є розроблені електричні схеми. Дослідження функціонування віртуальної моделі інвертора виконувалось методом математичного

моделювання. Для кількісної оцінки отриманих результатів використовувались методи аналітичного розрахунку.

Результати досліджень та їх обговорення. При проектуванні перетворювального пристрою в системі керування положенням для живлення безколекторного двигуна постійного струму (БДПС) потужності 5 Вт враховувались критично важливі вимоги щодо застосування системи у специфічних умовах. Крім вимог щодо енергоефективності необхідно, також, врахувати вимоги щодо забезпечення у конструкції таких пристроїв мінімізації електромагнітних перешкод. З урахуванням цих вимог було розроблено друковану плату, що містить мікроконтролер ATmega128-16AU та драйвери IR2104. Загальний вигляд друкованої плати зображено на рис. 1.

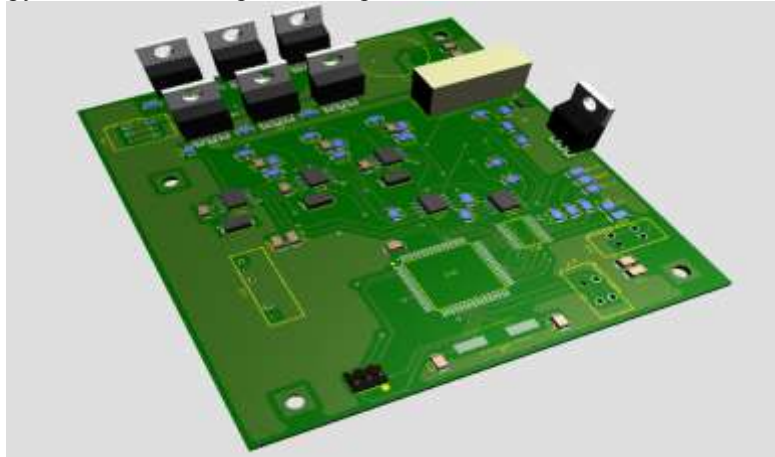


Рисунок 1 - Загальний вигляд друкованої плати

Розробка плати відбувалась у три етапи. На першому етапі створюється схема синусоїдального генератора, який генерує 3-фазні сигнали з частотою, що відповідає частоті живлення двигуна.

На рис. 2 зображено електричну схему однієї з фаз генератора. Електричні схеми інших двох фаз мають аналогічний вигляд.

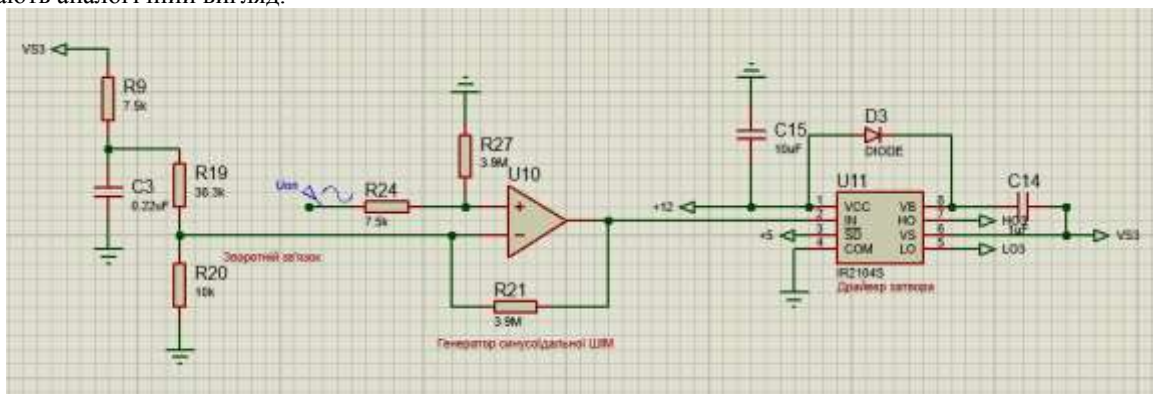


Рисунок 2 - Електрична схема однієї з фаз генератора

Фазові сигнали мають зсув 120° , що є необхідною умовою для забезпечення симетричної трифазної системи живлення [4]. Побудова схеми трифазного інвертора виконувалась на другому етапі розробки.

Схема трифазного інвертора з шістьма MOSFET-транзисторами, що комутуються відповідно до сигналів ШІМ зображено на (рис. 3).

Використання драйверів IR2104 дозволяє керувати як верхніми, так і нижніми транзисторами кожного плеча. Драйвери, також, формують необхідну напругу для забезпечення коректної роботи MOSFET-транзисторів [5].

Розробка генератора ШІМ-сигналів здійснювалась на третьому етапі. Сигнали широтно-імпульсної модуляції формуються на основі опорних синусоїдальних сигналів кожної фази $U_{оп}$. Підвищення частоти перемикання груп транзисторів дозволяє зменшити гармонічні спотворення вихідного сигналу [6]. Функціональна схема трифазного генератора ШІМ представлена на рис. 4.

Блок транзисторів Q1–Q6 формує напругу живлення на навантаженні у відповідності до сигналу завдання частоти. Опорні синусоїдальні сигнали ($U_{оп1}$, $U_{оп2}$, $U_{оп3}$) з виходу цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) з урахуванням сигналів зворотних зв'язків (ЗЗ) подаються на вхід блоку регуляторів і далі, драйвери блоку комутації забезпечують керування станом транзисторів. Використання П-

регуляторів дозволяє практично без запізнення передавати сигнал керування до драйверів блоку комутації [7]. Мікроконтролер (МК) відповідно до сигналу завдання частоти через шину даних формує вхідний сигнал ЦАП.

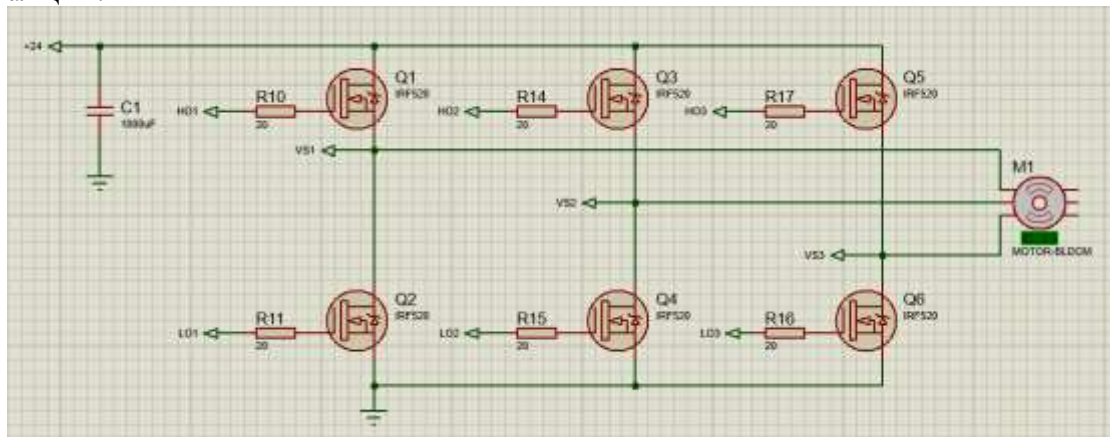


Рисунок 3 - Схема трифазного інвертора з шістьма MOSFET-транзисторами

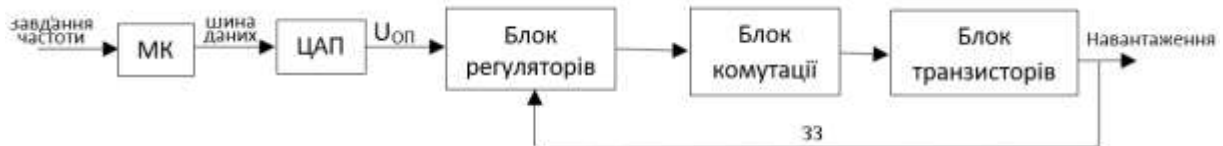


Рисунок 4 - Функціональна схема трифазного генератора ШІМ

Дослідження характеристик спроектованого пристрою з використанням програмного середовища *Proteus*, дозволяє оцінити ступінь спотворення синусоїдального сигналу вихідних напруг для умов реальної його експлуатації. Характер залежності спотворень гармонічного сигналу вихідної напруги перетворювача в залежності від несучої частоти ШІМ зображено на рис. 5. Аналіз характеристики (рис. 5) свідчить про те, що із збільшенням частоти ШІМ зменшується коефіцієнт пульсації синусоїди вихідного сигналу напруги, тобто підвищується енергоефективність всього електротехнологічного комплексу.

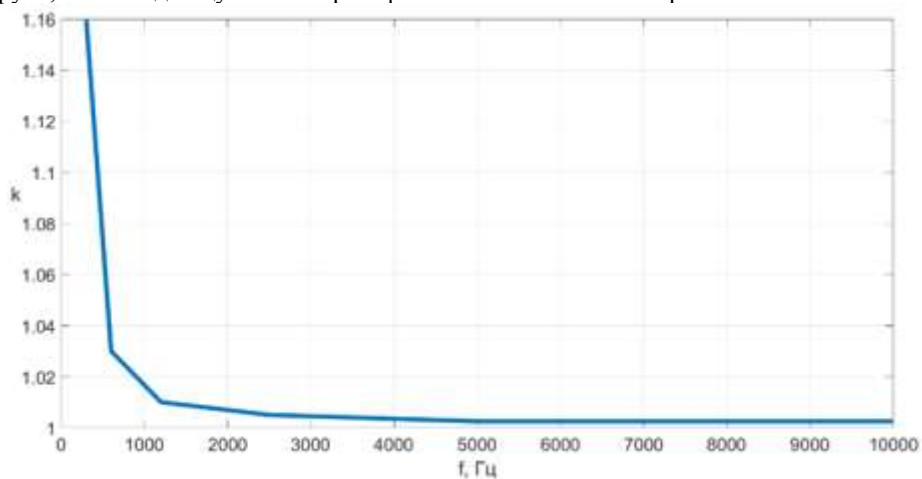


Рисунок 5 - Графік залежності коефіцієнта пульсації синусоїди від частоти ШІМ

При остаточному виборі частоти ШІМ необхідно приймати компромісне рішення враховуючи той факт, що рівень втрат у силових елементах перетворювача збільшується з підвищенням частоти [8]. Знаходження оптимального співвідношення між частотою ШІМ за показником спотворення гармонічного сигналу напруги на виході і рівнем втрат є доволі складною задачею для вирішення якої необхідно проводити велику кількість досліджень [9]. Розрахункове значення величини втрат у силових елементах в залежності від частоти ШІМ визначалась за виразом:

$$P_3 = I_{DS}^2 * R_{DS(on)} * D + \left(\frac{t_{on} + t_{off}}{2} \right) * U_{DS} * I_{DS} * f_s$$

де t_{on} , t_{off} – час включення і відключення транзистора;

I_{DS} – максимальний струм, що протікає через перехід стік-витік у режимі насичення, А;
 U_{DS} – напруга стік-витік, В;
 D – коефіцієнт заповнення ШІМ;
 f_s – частота перемикавання транзистора, Гц.
 Час включення t_{on} транзистора:

$$t_{on} = \frac{U_{DS} * C_{RSS} * (R_{OR} + R_G)}{U_{GSF} - U_{GP}} + (R_{OR} + R_G) * C_{ISS} * \ln \left(\frac{U_{GSF} - U_{GS(TH)}}{U_{GSF} - U_{GP}} \right).$$

де C_{RSS} – зворотна перехідна ємність транзистора, Ф;
 R_{OR} – опір на включення транзистора, Ом;
 R_G – внутрішній опір затвора транзистора, Ом;
 U_{GSF} – напруга затвор-витік, В;
 U_{GP} – напруга при якій настає ефект Міллера, В;
 C_{ISS} – вхідна ємність транзистора, Ф;
 $U_{GS(TH)}$ – порогова напруга затвор-витік, В;
 Час виключення t_{off} транзистора:

$$t_{off} = (R_{OF} + R_G) * \left(\frac{C_{RSS} * U_{DS}}{U_{GP}} + \frac{C_{ISS} * U_{GP}}{U_{GS(TH)}} \right)$$

де R_{OF} – опір на виключення транзистора, Ом;
 C_{RSS} – зворотна перехідна ємність транзистора, Ф.

На рис. 6 зображено залежність втрат у силових транзисторах від частоти ШІМ. Ця залежність має практично лінійний характер.

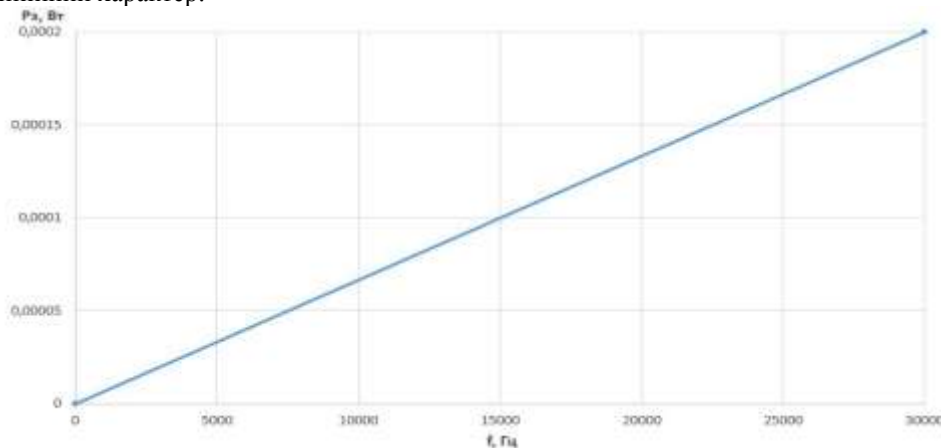


Рисунок 6 - Графік залежності потужності, що виділяється на транзисторі від частоти перемикавання транзистора

У разі застосування джерела постійного струму для живлення схеми у силових ланцюгах з MOSFET-транзисторами можуть виникати високочастотні коливання і короточасні піки струму. У схемній реалізації для їх згладжування передбачено конденсатор С1 (рис. 3) з ємністю, яка є достатньою для мінімізації перепадів напруги та забезпечення стабільного живлення силових компонентів [10]. Застосування електролітичного конденсатора передбачає реалізацію системи плавного заряду при підключенні його до джерела живлення задля компенсації стрибка струму. Використання такої системи дозволяє продовжити термін експлуатації конденсатора [11]. Схему системи плавного заряду конденсатора С1 в середовищі Proteus зображено на рис. 7.

Результат моделювання процесу заряду конденсатора представлено на рис. 8.

За результатами моделювання тривалість аперіодичного характеру зарядження конденсатора до величини напруги $0.95U_{ном}$ з дозарядженням до значення $U_{ном}$ (час повного зарядного стану) становить приблизно 600 мс. Такий час заряду конденсатора дозволяє забезпечити необхідну стартову готовність для функціонування інвертора та підвищити загальну надійність системи.

Висновки і перспективи.

За допомогою використання програмного середовища *Proteus* виконано розведення двохшарової друкованої плати з урахуванням вимог щодо мінімізації електромагнітних завад та забезпечення належного охолодження силових компонентів.

Спроектовано та обрано апаратну частину системи керування БДПС.

За результатами досліджень віртуальної моделі трифазного інвертора визначено, що використання драйверів *IR2104* для керування MOSFET-транзисторами забезпечує ефективну комутацію і стабільність форми його вихідної напруги.

Встановлено, що з підвищенням частоти перемикання транзисторів зменшуються гармонічні спотворення та одночасно збільшуються комутаційні втрати.

Рекомендовано для остаточного вибору робочого діапазону частот ШІМ інвертора враховувати не тільки ступінь спотворень заданого гармонічного сигналу, але й комутаційні втрати в його силових ключах.

Подальша розробка вузла відеоспостереження передбачає використання спроектованого інвертора для живлення БДПС при дослідження функціонування системи автоматичного керування положенням.

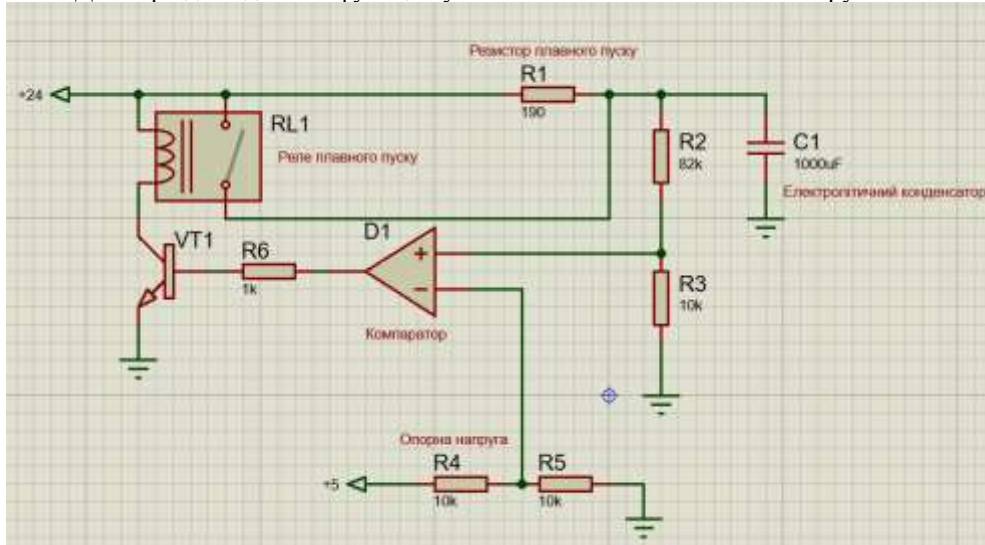


Рисунок 7 - Схема плавного заряду конденсатора C1 в середовищі Proteus

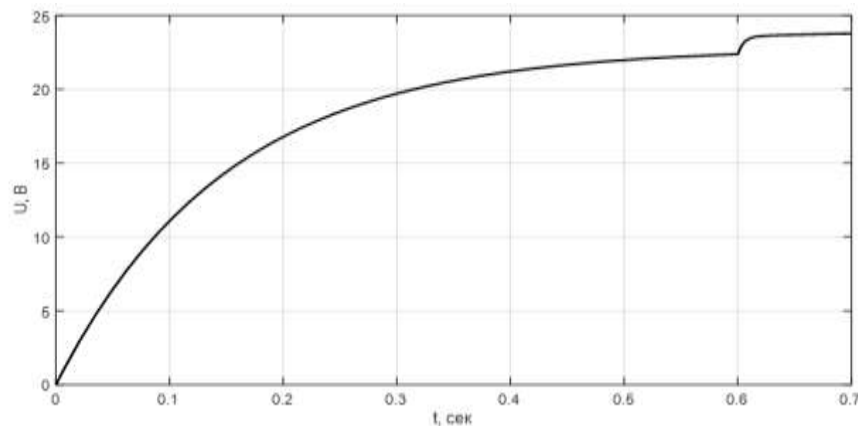


Рисунок 8 - Напряга на конденсаторі

Список використаної літератури

1. Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. Wiley, 2002.
2. Rashid, M. H. "Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications." Pearson, 2013.
3. Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., & Blaabjerg, F. "Control in Power Electronics: Selected Problems." Academic Press, 2002.
4. T.J.E. Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctant Motor Drives," Oxford, 1989.
5. International Rectifier Application Note AN-978. IR2104: Half-Bridge Driver IC
6. Design of FOC Brushless DC (BLDC) Motor Controller – Rohita Lokhande, Prof. Priyanka Dukre.
7. Speed Control Of Bldc Motor Using Sensorless Field Oriented Control By Svpwm Technique – Madhu A Karadi, Dr Balaji N.
8. Brushless DC Motor Fundamentals Application Note - Prepared by Jian Zhao/Yangwei Yu July 2011.
9. Erickson, R. W., Maksimovic, D. Fundamentals of Power Electronics. – 2nd ed. – Boston: Springer, 2001.
10. Deboy, G., Treu, M. Switching Loss Analysis of Power MOSFETs: A New Insight // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2015.
11. L. Umanand Power Electronics: Essentials & Applications Paperback – January 1, 2009

RESEARCH OF THE CHARACTER OF HARMONIC DISTORTIONS AND HEAT LOSSES OF THE INVERTER DURING OUTPUT VOLTAGE FORMATION

Increasing the effectiveness of visualization systems for performing tasks in modern combat operations is possible with adequate situational awareness through the use of automatic threat detection technologies. An important aspect of the development of such visualization systems is the study of the influence of the inverter's PWM frequency on the quality of its output voltage formation. As a result of the switching processes of the inverter's power elements, distortions of the given harmonic signal occur. In addition, as is known, this process is also accompanied by heat losses. Therefore, the study of the degree of influence of harmonic signal distortions and heat losses on the energy efficiency of the visualization electrotechnological complex depending on the PWM frequency is relevant. To quantitatively assess the degree of influence of these factors, a study of the functioning of the developed design of a two-layer printed circuit board was conducted. The selection and arrangement of the board elements were carried out in accordance with the technical requirements for the implementation of the inverter, taking into account the condition for ensuring the minimization of electromagnetic interference in the compact design of such devices. The development of the board and the study of its functioning were carried out using the Proteus software environment. When developing the printed circuit board, a circuit solution was provided to smooth out the possible occurrence of high-frequency oscillations and short-term current peaks when connecting the power part of the inverter to a DC power supply. The ATmega128-16AU microcontroller was selected to generate control signals for the IR2104 gate drivers of the inverter's power MOSFET transistors. The results of the research indicate that with an increase in the inverter's PWM frequency, harmonic distortion decreases. The shape of this dependence is hyperbolic. At the same time, an increase in the PWM frequency leads to an increase of heat losses.

Keywords: visualization system, switching, inverter, frequency, pulse-width modulation, position control system, energy efficiency.

References

1. Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. Wiley, 2002.
2. Rashid, M. H. *"Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications."* Pearson, 2013.
3. Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., & Blaabjerg, F. *"Control in Power Electronics: Selected Problems."* Academic Press, 2002.
4. T.J.E. Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctant Motor Drives," Oxford, 1989.
5. International Rectifier Application Note AN-978. IR2104: Half-Bridge Driver IC
6. Design of FOC Brushless DC (BLDC) Motor Controller – Rohita Lokhande, Prof. Priyanka Dukre.
7. Speed Control Of Bldc Motor Using Sensorless Field Oriented Control By Svpwm Technique – Madhu A Karadi, Dr Balaji N.
8. Brushless DC Motor Fundamentals Application Note - Prepared by Jian Zhao/Yangwei Yu July 2011.
9. Erickson, R. W., Maksimovic, D. *Fundamentals of Power Electronics*. – 2nd ed. – Boston: Springer, 2001.
10. Deboy, G., Treu, M. *Switching Loss Analysis of Power MOSFETs: A New Insight // IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2015.
11. L. Umanand *Power Electronics: Essentials & Applications Paperback* – January 1, 2009

Надійшла: 20.02.2025

Received: 20.02.2025

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ТУРБОМЕХАНІЗМІВ НА ОСНОВІ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ЗМІННИМ СТРУМОМ

Робота присвячена аналізу електромеханічних властивостей вентильних двигунів (ВД) зі збудженням змінним струмом у застосуванні до електроприводів (ЕП) турбомеханізмів (вентиляторів, насосів, турбокомпресорів). Оскільки такі механізми споживають близько 25% електроенергії у промисловості, оптимізація їхніх ЕП є критично важливим завданням. Запропоновано схему ВД, яка усуває проблему відсутності машинної комутації вентилів інвертора на низьких частотах і під час пуску.

Проведено математичний аналіз характеристик ВД, зокрема досліджено оптимальну частоту збудження, що забезпечує мінімальну потужність перетворювачів у роторі та статорі. Показано, що при частоті збудження 4–6 Гц сумарна потужність перетворювачів знижується на 15–20% у порівнянні з традиційними схемами подвійного живлення. Також показано, що зміна напрямку обертання поля збудження дозволяє розширити діапазон регулювання швидкості, що підвищує адаптивність системи до змінних умов експлуатації.

Отримані результати демонструють переваги запропонованого підходу, зокрема зниження теплових втрат, підвищення перевантажувальної здатності ЕП та виключення необхідності у встановленні датчика положення ротора. Запропоновані рішення можуть бути використані для розробки високоефективних систем керування турбомеханізмами.

Ключові слова: електропривод, турбомеханізми, вентильний двигун, збудження змінним струмом, комутація вентилів, оптимізація частоти збудження.

Вступ.

Ефективність використання електроенергії в промислових системах значною мірою залежить від досконалості електроприводів (ЕП), особливо для турбомеханізмів - вентиляторів, насосів і турбокомпресорів, які є обладнанням масового застосування. Ці машини споживають близько 25% загального обсягу електроенергії, що виробляється в світі, що робить актуальним пошук економічних і технічно прогресивних рішень для їхнього управління [1]. Одним із ключових завдань є забезпечення регулювання продуктивності турбомеханізмів із мінімальними енергетичними втратами, що можливо завдяки оптимізації частоти обертання ЕП.

Вентильні двигуни (ВД) зі збудженням змінним струмом знаходять застосування в сучасних ЕП турбомеханізмів, таких як вентилятори, насоси та турбокомпресори. Це обумовлено їхніми перевагами порівняно з традиційними асинхронними двигунами (АД) з частотно-регульованими приводами (ЧРП), а саме:

1. Висока енергоефективність: ВД мають менші втрати енергії завдяки відсутності комутаційних втрат і мінімізації реактивної потужності. Це сприяє зниженню експлуатаційних витрат та підвищенню загальної ефективності системи.

2. Широкий діапазон регулювання швидкості: ВД забезпечують стабільну роботу при низьких швидкостях обертання, що є критичним для деяких застосувань турбомеханізмів.

3. Висока надійність та довговічність: Відсутність щітково-колекторного вузла зменшує механічне зношування, що підвищує надійність та знижує потребу в обслуговуванні.

4. Компактність та зменшена маса: ВД мають менші габарити та масу порівняно з традиційними АД, що спрощує їх інтеграцію в існуючі системи.

Недоліки ВД:

1. Складність керування: ВД вимагають складних систем керування для забезпечення синхронізації та стабільної роботи, що може підвищувати вартість системи.

2. Значна вартість: Через використання спеціалізованих матеріалів та компонентів, ВД можуть бути дорожчими у виробництві та обслуговуванні ніж ЧРП.

3. Чутливість до умов експлуатації: ВД є більш чутливими до змін напруги та частоти живлення у порівнянні з ЧРП, що вимагає додаткових заходів для забезпечення стабільної роботи.

Порівняно з ВД, ЧРП мають недоліки, такі як нижча енергоефективність при змінних навантаженнях та обмежений діапазон регулювання швидкості. Тож вибір між ВД та ЧРП залежить від конкретних вимог застосування, оскільки ВД пропонують вищу енергоефективність та надійність, але

вимагають складніших систем керування та можуть бути дорогими. Проте для потужних турбомеханізмів з різкозмінним профілем навантаження, ВД, зазвичай, є оптимальним варіантом.

Інші підходи до регулювання, такі як використання асинхронних машин (АМ) із фазним ротором у режимі подвійного живлення або ЕП постійного струму, мають також суттєві недоліки порівняно з ВД: складність конструкції, недостатня ефективність на низьких частотах і високі теплові втрати. У цьому контексті ЕП на основі ВД зі збудженням змінним струмом пропонують перспективну альтернативу.

Метою цього дослідження є аналіз електромеханічних властивостей ВД із трифазним змінним струмом низької частоти, і визначення оптимальних параметрів роботи турбомеханізмів. Новизна роботи полягає в усуненні проблеми відсутності машинної комутації під час пуску та в пропозиції оптимальної частоти збудження для зниження потужності перетворювачів.

Постановка задачі дослідження.

Проблематика управління турбомеханізмами та діагностики їхнього технічного стану є предметом численних досліджень. У працях [1, 2] розглянуто основи технічної діагностики гідравлічних приводів, підкреслено важливість раннього виявлення несправностей для забезпечення стабільної експлуатації. У [3] проаналізовано закономірності зміни робочих режимів шахтних водовідливних установок, що стало основою для розробки адаптивних систем управління. Сучасні дослідження, такі як [4-9], зосереджуються на застосуванні ВД для підвищення енергоефективності машин великої потужності, наголошуючи на їхніх перевагах перед традиційними рішеннями.

Для регулювання частоти обертання турбомеханізмів традиційно застосовують АМ з фазним ротором у режимі подвійного живлення [3]. Проте ці системи мають обмеження, зокрема складність комутації клапанів і значні енергетичні втрати на низьких частотах. Альтернативний підхід - ВД з постійним струмом збудження, описані в [5], - демонструють кращі характеристики, але їхня ефективність знижується через відсутність машинної комутації під час пуску. У цьому дослідженні пропонується схема ВД зі збудженням трифазним змінним струмом, яка усуває ці недоліки, забезпечуючи стабільну роботу в усьому діапазоні частот обертання.

Аналіз літератури [3-9] показав, що для більшості турбомеханізмів досить мати три-чотири робочих швидкості, що досягаються економічними з точки зору споживання електроенергії засобами. Такі режими легко реалізуються ЕП за схемою ВД на основі синхронної машини зі збудженням постійним струмом. Управління тиристорами інвертора здійснюється сигналом датчика положення або датчика ЕРС ротора. Головний недолік подібної схеми - відсутність машинної комутації клапанів інвертора під час пуску і роботи на малих частотах обертання. Цей недолік усувається у ВД зі збудженням трифазним змінним струмом (рис. 1).

Якорем двигуна служить ротор АМ, в коло якого включений перетворювач з ланкою постійного струму. Як індуктор використовується статор АМ, що живиться від перетворювача трифазної напруги низької частоти. У даній схемі магнітне поле збудження обертається, завдяки чому в роторі наводиться ЕРС навіть при нульовій швидкості двигуна. Цим забезпечується машинна комутація залежного інвертора в усьому діапазоні частот обертання, в тому числі й при пуску. Важливою перевагою ВД зі збудженням змінним струмом є також відсутність необхідності у встановленні на валу АМ датчика положення ротора.

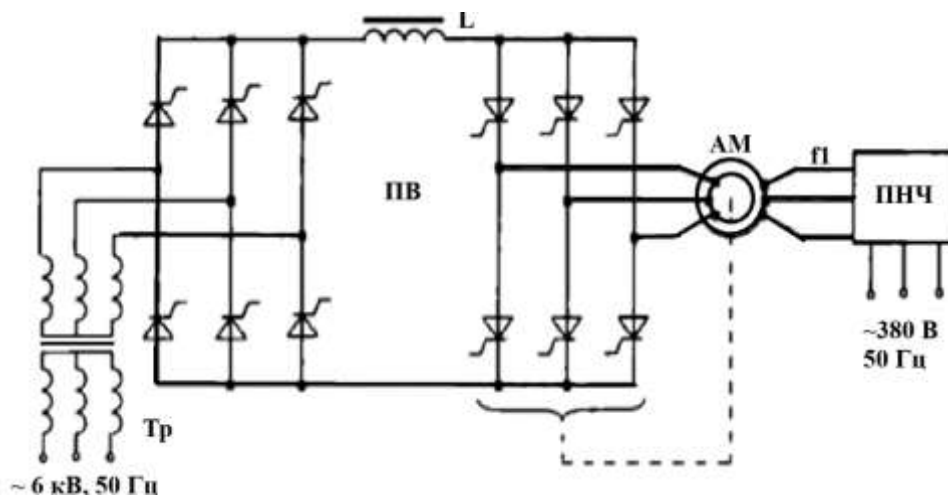


Рисунок 1 - Система живлення: *Tr* – понижуючий трансформатор (~6 кВ, 50 Гц), *ПВ* – силовий випрямляч; *L* (Дросель) – згладжуючий дросель, *АМ* – асинхронний електродвигун *f1* (Частотний сигнал) – зв'язок із ПНЧ; *ПНЧ* (Перетворювач частоти) – частотний перетворювач (~380 В, 50 Гц)

Цей недолік усувається у ВД зі збудженням трифазним змінним струмом (див. рис. 1). У цій схемі ротор АМ виконує функцію якоря, до якого підключено перетворювач із ланкою постійного струму (ПВ). Статор, як індуктор, живиться від перетворювача трифазної напруги низької частоти. Завдяки обертанню магнітного поля збудження в роторі виникає ЕРС навіть за нульової швидкості двигуна, що забезпечує машинну комутацію залежного інвертора в усьому діапазоні частот обертання, включно з пусковим режимом. Важливою перевагою є відсутність потреби в установці датчика положення ротора на валу АМ, що спрощує конструкцію та знижує собівартість системи.

Основні матеріали дослідження.

Аналітичні залежності, що визначають механічні характеристики ВД зі збудженням змінним струмом, отримані на основі моделі машини подвійного живлення [4] або асинхронно-вентильного каскаду з регульованою роторною групою вентилів [3]. Коефіцієнт ковзання S у схемі ВД має той самий зміст, що й у стандартній схемі увімкнення АМ, і визначається як:

$$S = (\omega_1 + \omega) / \omega_1 = \omega_2 / \omega_1 = f_2 / f_1,$$

де ω — частота обертання ротора; $\omega_1 = 2\pi f_1 / p$, $\omega_2 = 2\pi f_2 / p$ - кутові швидкості обертання магнітного поля відносно статора і ротора; $f_1, f_2 = f_1 + p / (2\pi)$ - частоти напруги статора і ротора; p — число пар полюсів. При обертанні ротора проти напрямку поля статора (що характерно для пускового режиму) $S \geq 1$.

Дослідження характеристик ВД виконувалося з урахуванням загальноприйнятих припущень про заміну реальних несинусоїдальних напруг, ЕРС і струмів їхніми першими гармоніками. Рівняння електричної рівноваги фаз первинної та вторинної обмоток АМ в режимі ВД мають вигляд

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 X_1 / S + j \dot{I}_2 X_{21} / S = \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 X_1 / S - \dot{E}_1, \tag{1}$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 r_2 + j \dot{I}_2 X_2 + j \dot{I}_1 X_{12} = \dot{I}_2 r_2 + j \dot{I}_2 X_2 - \dot{E}_2, \tag{2}$$

де I_1, I_2 — струми статора і ротора; U_1, U_2, E_1, E_2 — фазні напруги та ЕРС статора і ротора; X_1, X_2 — індуктивні опори розсіювання статора і ротора; X_{m1}, X_{m2} — головні індуктивні опори, зумовлені основними гармоніками магнітного поля; X_{12}, X_{21} — індуктивні опори взаємної індукції; r_1, r_2 — активні опори. Усі індуктивні опори зведено до частоти ротора f_2 , тому в першому рівнянні присутній коефіцієнт $1/S$. Якщо позначити $\varepsilon = f_{1н} / f_1$, де $f_{1н} = 50$ Гц, то індуктивні опори в (1) і (2) будуть зв'язані з відповідними номінальними значеннями (на частоті 50 Гц) множителем S : $X_1 = X_{1н} S / \varepsilon$, $X_2 = X_{2н} S / \varepsilon$ тощо.

Для спрощення аналізу режим роботи машини зведено до еквівалентного режиму нерухомої машини. Помноживши обидві частини першого рівняння на S , отримуємо:

$$S \dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 S + j \dot{I}_1 X_1 - S \dot{E}_1, \quad \dot{U}_2 = \dot{I}_2 r_2 + j \dot{I}_2 X_2 - \dot{E}_2. \tag{3}$$

Ці рівняння відповідають схемі заміщення, зображеній на рис. 2, де X_0 — індуктивний опір намагнічувального контуру, зведений до ротора. Струм намагнічувального контуру $I_0 = I_1 + I_2$, а напруга на його затискачах: $S \dot{E}_1 = \dot{E}_2$.

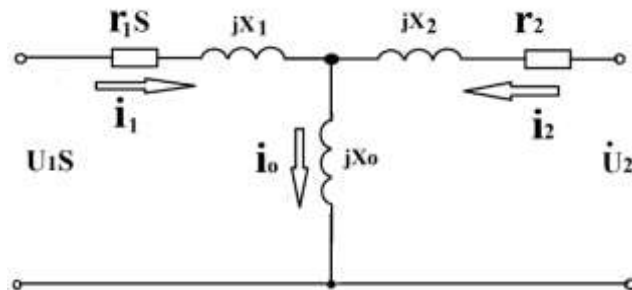


Рисунок 2 – Узагальнена еквівалентна схема СМ, що використовує параметри опору та реактивного опору для аналізу роботи: $U_1 S$, - вхідна напруга первинної обмотки $r_1 S$ – активний опір первинної обмотки, jX_1 – індуктивний опір первинної обмотки, i_1 – струм первинної обмотки, i_0 – струм намагнічення, jX_0 – індуктивний опір намагнічувального кола, jX_2 – індуктивний опір вторинної обмотки, r_2 – активний опір вторинної обмотки, i_2 – струм вторинної обмотки, U_2 – вихідна напруга вторинної обмотки

Для дослідження процесів у колі ротора схему заміщення (рис. 2) перетворено за теоремою про еквівалентний генератор (рис. 3). Коефіцієнт c_1 , відомий із теорії АМ, має вигляд:

$$c_1 = \dot{U}_1 / \dot{E}_1 = 1 + X_1 / X_m - j r_1 \varepsilon / X_{он} \approx 1 + X_{1н} / X_{он}, \tag{4}$$

де $\varepsilon = f_{10} / f_1$, $f_{1н} = 50$ Гц — номінальна частота.

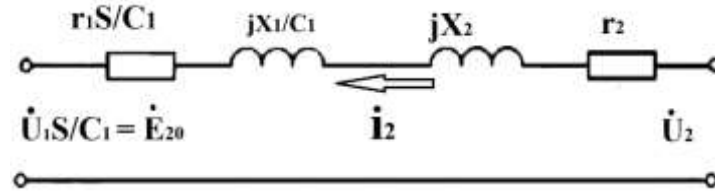


Рисунок 3 - Еквівалентна схема заміщення СМ, що використовується для аналізу роботи ВД зі збудженням змінним струмом у контексті ЕП турбомеханізмів: $\dot{U}_1 S / C_1 = \dot{E}_{20}$ – вхідна напруга первинної обмотки (статора), зведена до коефіцієнта ковзання S та числа пар полюсів C_1 , що дорівнює ЕРС холостого ходу \dot{E}_{20} , $r_1 S / C_1$ – активний опір первинної обмотки (статора), врахований з коефіцієнтом ковзання S та числом пар полюсів C_1 , jX_1 / C_1 – індуктивний опір розсіювання первинної обмотки (статора), зведений до числа пар полюсів C_1 , \dot{I}_1 – струм первинної обмотки (статора), jX_M – індуктивний опір намагнічувального контуру, \dot{I}_M – струм намагнічування, jX_2 – індуктивний опір вторинної обмотки (ротора), r_2 – активний опір вторинної обмотки (ротора), \dot{I}_2 – струм вторинної обмотки (ротора), \dot{U}_2 – вихідна напруга вторинної обмотки (ротора).

Ця схема використовується для аналізу електромеханічних характеристик ВД, зокрема для визначення оптимальної частоти збудження, яка, як зазначено в статті, становить 4–6 Гц, що дозволяє знизити сумарну потужність перетворювачів на 15–20% порівняно з традиційними схемами подвійного живлення.

Для того, щоб у схемі ВД забезпечити номінальний намагнічуваний струм машини I_{0H} , коли нема струму в роторі, напруга збудження U_1 і номінальна напруга статора в нормальній схемі ввімкнення U_{1H} повинні дорівнювати

$$\begin{aligned} U_1 &= C_1 E_1 = C_1 I_{0H} (X_{1H} + X_{mln}) / \varepsilon; \\ U_{1H} &= C_1 E_{1H} = C_{1H} I_{0H} (X_{1H} + X_{mln}), \end{aligned}$$

звідки $U_1 / U_{1H} = E_1 / E_{1H} = 1 / \varepsilon$, що відповідає відомому закону зміни напруги при частотному управлінні АД.

Електромагнітний момент ВД розраховується за формулою

$$M = E_d I_d (S - 1) / (S \omega) = 3(\sqrt{6} E_{20} I_d \cos \beta + X_K I_d^2) / (\pi \omega_2), \quad (5)$$

$$\text{де } E_d = 3(\sqrt{6} E_{20} \cos \omega + X_K I_K) / \pi \quad (6)$$

середнє значення ЕРС на вході інвертора, β — кут випередження відмикання вентилів інвертора відносно комутуючої ЕРС.

У формулу (5) входить частота ω_2 , електромагнітний момент від неї не залежить, оскільки E_{20} і X_K також пропорційні ω_2 : $E_{20} = E_{2H} S / \varepsilon$; $X_K = X_{KH} S / \varepsilon$; $\omega_2 = \omega_{1H} S / \varepsilon$, де E_{2H} – номінальна фаза ЕРС ротора АМ; X_{KH} – значення X_K на частоті 50 Гц. Отже, $M = 3(\sqrt{6} E_{2H} I_d \cos \beta + X_{KH} I_d^2) / (\pi \omega_{1H})$.

Для даної системи ЕП дуже важливим є визначення оптимальної частоти збудження, що забезпечує мінімальну потужність перетворювача в статорі і роторі.

Дослідження характеристик ВД показало, що оптимальна частота збудження f_{10} лежить у межах 4–6 Гц залежно від кута β , що забезпечує мінімальну сумарну встановлену потужність перетворювачів у роторі та статорі. Сумарна потужність двох перетворювачів розраховується як:

$$P = 3(U_1 I_{1n} + E_{2n} I_{2n}),$$

де I_{1n}, I_{2n} — номінальні струми статора і ротора, U_1 — фазна напруга статора, E_{2n} — номінальна ЕРС ротора.

У режимі обертання магнітного поля статора і ротора в одному напрямку частота струму в роторі визначається як:

$$f_2 = \omega_{1H} p / (2\pi) - f_{10}. \quad (7)$$

При протилежному обертанні:

$$f_2 = \omega' p / (2\pi) + f_{10}. \quad (8)$$

Прирівнюючи ці вирази, отримуємо:

$$\omega' = \omega_{1H} - 2\omega_1 = \omega_{1H} (1 - 2/\varepsilon).$$

Із залежності (9) видно, що чим більша частота поля збудження f_{10} , тим більша частину потужності ЕП споживає через старор і тим меншу – через ротор. Тому сумарна встановлена потужність перетворювальних агрегатів у ротора і старої може мати мінімум при деякому значенні f_{10} .

Сумарна потужність двох перетворювачів дорівнює $P = 3(U_1 I_{1H} + E_{2T} I_{2H})$, де I_{1H}, I_{2H} – номінальні струми статора і ротора АМ; U_1 – фазна напруга статора; E_{2T} – напруга вторинної обмотки трансформатора при холостому ході.

Установлена потужність перетворювачів у відносних одиницях

$$P^* = P / (3E_{2H}I_{2H}) = C_1 k_i / \varepsilon + U_2^*, \quad (10)$$

де $C_1 = U_1 / E_1$; $k_i = I_{1H} / I_{2H}$; I_{1H} – номінальний струм статора, наведений до ротора; E_1 – ЕРС статора; U_2^* – коефіцієнт запасу відносно номінальної ЕРС ротора АМ.

Якщо магнітне поле статора і ротор обертаються в одному напрямку, то

$$U_{2*}' = \cos \beta \{A_{max}[(\varepsilon - 1)(1 + r_{1*}) + r_{2*}\varepsilon] + \varepsilon - 1\} / \varepsilon, \quad (11)$$

де

$$A_{max} = 0,5(1 / \cos \beta - 1), \beta < 60^\circ$$

$$A_{max} = (\sqrt{1 + \sin(2\beta - 60^\circ)} / \cos^2 \beta - 1) / 2, \beta \geq 60^\circ; \quad (12)$$

r_{1*}, r_{2*} – еквівалентні опори статора і ротора.

Якщо магнітне поле статора і ротор обертаються в протилежних напрямках, то

$$U_{2*}' = \cos \beta \{A(\varepsilon + 1)[(1 + r_{1*}) + r_{2*}\varepsilon] + \varepsilon + 1\} / \varepsilon \quad (13)$$

Продиференціювавши (10) по ε з урахуванням (11) і (13) і прирівнявши похідні до нуля, дістанемо

$$\varepsilon_0' = \sqrt{(c_1 k_i / \cos \beta - A_{max} - 1) / (r_{1*} A_{max})}; \quad (14)$$

$$\varepsilon_0 = \sqrt{(c_1 k_i / \cos \beta + A_{max} + 1) / (r_{1*} A_{max})} \quad (15)$$

Співвідношення (14) має зміст тільки при

$$c_1 k_i / \cos \beta > A_{max} + 1 \quad (16)$$

Вважаючи, що $\beta < 60^\circ$ і підставляючи A_{max} з (12) в (16), після перетворень дістанемо

$$c_1 k_i > \cos^2(\beta/2) \quad (17)$$

Оскільки $c_1 \geq 1$ і $k_i > 1$, то нерівність (17) завжди виконується і функція (10) має мінімум. Порівняння співвідношень (14) і (15) показує, що ($\varepsilon_0' < \varepsilon_0$), тобто в системі з третього напрямку поля зсуву оптимальна частота поля більша.

За допомогою формули (10) при заданій частоті збудження можна визначити мінімальну суму потужностей перетворювачів.

Формула сигналу заданої частоти f_1 перетворювача-збуджувача відбувається звичайно в функції заданої швидкості обертання двигуна. При пуску поле збудження в напрямку, протилежному напрямку обертання ротора, з частотою $f_1 = f_{13}$. У такому режимі система працездатна до досягнення швидкості $\omega = \omega_n(1 - 1/\varepsilon)(1 - 2/\varepsilon)$.

При подальшому збільшенні швидкості відбувається зменшення частоти f_1 до нуля з наступним збільшенням її до первинного значення f_{10} , але з напрямком обертання поля, що збігається з напрямком обертання ротора.

Висновки.

Дослідження отриманих залежностей показує, що:

- у ВД зі збудженням змінним струмом існує оптимальне значення частоти поля збудження, що забезпечує мінімальну сумарну встановлену потужність перетворювальних агрегатів у роторі і статорі. Ця частота залежно від кута β випередження відмикання вентилів інвертора становить 4-6 Гц;
- керуючи частотою поля збудження і напрямком його обертання, можна змінювати швидкість обертання робочого колеса турбомашини при куті управління трансформаторною групою вентилів $\alpha_T = 0$, що забезпечує найбільш економічний режим;
- при переведенні АМ у режим ВД зі збудженням змінним струмом виключається несиметричне нагрівання обмоток статора, знижуються теплові втрати і, отже, відпадає необхідність у значному запасі потужності двигуна [3].

Додатковою перевагою ВД зі збудженням змінним струмом є зниження теплових втрат завдяки виключенню несиметричного нагрівання обмоток статора. Це зменшує потребу в запасі потужності двигуна, підвищуючи його перевантажувальну здатність на 10–15% порівняно з АМ в режимі подвійного живлення.

ЕП із ВД зі збудженням трифазним змінним струмом є ефективним рішенням для турбомеханізмів завдяки таким перевагам:

- забезпечення машинної комутації вентилів інвертора в усьому діапазоні частот обертання, включно з пусковим режимом.
- відсутність потреби в датчиках положення ротора, що спрощує конструкцію та знижує витрати.
- оптимальна частота збудження (4–6 Гц), яка мінімізує сумарну потужність перетворювачів у роторі та статорі.
- можливість регулювання швидкості обертання шляхом зміни частоти та напрямку поля збудження, що забезпечує економічний режим роботи.
- зниження теплових втрат і підвищення перевантажувальної здатності двигуна.
- результати дослідження підтверджують[3], що запропонована схема ВД перевершує традиційні рішення за енергоефективністю та гнучкістю.

O. Zakladnyi¹, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2813-3692

V. Prokopenko¹, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-5518-5802

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC DRIVE OF TURBOMACHINERY BASED ON A BRUSHLESS MOTOR WITH AC EXCITATION

This study is dedicated to analyzing the electromechanical properties of brushless motors (BM) with AC excitation for application in electric drives (ED) of turbomachinery (fans, pumps, turbo compressors). Since such mechanisms consume approximately 25% of industrial electricity, optimizing their ED is a critically important task. A BM topology is proposed to eliminate the issue of missing machine-side commutation of inverter switches at low frequencies and during startup.

A mathematical analysis of BM characteristics has been conducted, specifically investigating the optimal excitation frequency that ensures minimal power conversion in the rotor and stator. It has been shown that at an excitation frequency of 4–6 Hz, the total power of the converters decreases by 15–20% compared to conventional doubly fed schemes. Additionally, it is demonstrated that reversing the direction of the excitation field rotation allows for an extended speed regulation range, enhancing the system's adaptability to variable operating conditions.

The obtained results highlight the advantages of the proposed approach, including reduced thermal losses, increased overload capacity of the ED, and the elimination of the need for a rotor position sensor. The proposed solutions can be utilized in the development of high-efficiency control systems for turbomachinery.

Keywords: electric drive, turbomachinery, brushless motor, AC excitation, switch commutation, excitation frequency optimization.

References

1. O. M. Zakladnyi, A. V. Prakhovnyk, and O. I. Solovei, *Energy Saving in Industrial Electric Drives: A Textbook*. Kyiv: Kondor, 2005, 408 p.
2. O. O. Zakladnyi, "Energy efficiency of a brushless motor," *Energy: Economics, Technology, Ecology*, no. 4(58), pp. 99–105, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2019.200507>.
3. O. M. Zakladnyi and O. O. Zakladnyi, *Energy-Efficient Electric Drive with Brushless Motors* (in Ukrainian), 2nd ed., revised and extended. Kyiv: Libra Publishing House, 2013, 212 p. [Online]. Available: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/70374>.
4. Dai H., Wang Y. Analysis of Induction Motor Efficiency under Variable Frequency Drives // *Journal of Electrical Engineering*, 2021, Vol. 35, No. 4, pp. 203–218.
5. Hansen R., Lee S. Comparative Study of Variable Speed Drives for Turbo Compressors // *Applied Energy*, 2019, Vol. 251, Article 113364.
6. Bose B. K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. – Prentice Hall, 2002.
7. Mohan N. *Advanced Electric Drives: Analysis, Control, and Modeling Using MATLAB/Simulink*. – Wiley, 2014.
8. Pillay P. *Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives*. – Wiley, 2016.
9. Hendershot J. R., Miller T. J. E. *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*. – Magna Physics Publishing, 2010.

Надійшла: 11.02.2025

Received: 11.02.2025

ЛІБЕРАЛІЗОВАНІ РИНКИ ЕНЕРГІЇ

LIBERALIZED ENERGY MARKETS

УДК 621.317.318

DOI 10.20535/1813-5420.1.2025.324271

О.В. Коцар¹, канд.техн.наук, ORCID 0000-0002-7958-2335
Є.О. Касьяненко¹, магістрант, ORCID 0009-0008-6704-6616

РОЛЬОВІ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ МІКРОМЕРЕЖАМИ

Процеси децентралізації супроводжуються перетворенням традиційних розподільних мереж на активні системи розподілу, до яких інтегровано збалансовані мікромережі, що містять мікрогенерувальні установки переважно на базі альтернативних та відновлюваних джерел енергії, навантаження та установки зберігання енергії. Управління активними системами розподілу вимагає принципово нових концептуальних підходів, якими має бути враховано, зокрема, базові засади утворення мікромереж і бізнес-моделі управління ними. У статті досліджено бізнес-моделі та описано розроблені рольові моделі управління мікромережами за DSOMM, PC, FMM, а також визначено особливості національного нормативно-правового забезпечення процесів утворення та функціонування енергетичних кооперативів, що обумовило доцільність розробки окремих рольових моделей для управління мікромережами прибуткових та неприбуткових енергетичних кооперативів. Бібл. 13. Рис. 4.

Ключові слова: активний споживач, енергетичний кооператив, мікромережа, модель мікромережі, модель управління мікромережею, ОУЗЕ, рольова модель, DSOMM, PC, FMM.

Вступ. У серпні 2024 року Верховною Радою України було прийнято зміни до Закону України “Про ринок електричної енергії” [1] якими визначено, зокрема, терміни “мікромережа”, “користувач мікромережі”, “острівний режим мікромережі”. Проте, ще на етапі отримання законопроекту Верховною Радою науково-експертним висновком [2] до вищезгаданого закону було висунуто низку зауважень. Зокрема, експерти зазначили, що запропоновані нові терміни, якими пропонувалось доповнити Закон [1], використовуються лише у якості визначень і далі по тексту Закону взагалі не згадуються. Крім того, у законодавчому вимірі немає загально визнаного розуміння того, наприклад, що є “групою взаємопов’язаних навантажень” або “здатність мікромережі працювати паралельно з об’єднаною енергетичною системою (ОЕС) України”, а також не визначено механізми реалізації таких режимів. Отже, постає актуальним питання дослідження моделей управління мікромережами в рамках національного законодавчого простору.

Метою досліджень є розробка рольових моделей управління мікромережами в рамках законодавства України. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати національне законодавство, зокрема, в частині моделей мікромереж та управління ними; визначити особливості та оптимізувати бізнес-моделі управління мікромережами; розробити рольові моделі для кожної бізнес-моделі управління мікромережею.

Матеріал і результати досліджень. Сьогодні в науковій літературі виділяють три бізнес-моделі управління мікромережами, а саме: модель монополії оператора системи розподілу (*Distribution System Operator Monopoly Model*, DSOMM), консорціум просюмерів (*Prosumer Consortium*, PC) та модель вільного ринку (*Free Market Model*, FMM) [3]. У [4] досліджено можливість використання бізнес-моделей мікромереж в контексті нормативно-правової бази України. За результатами досліджень визначено, що національне законодавче забезпечення функціонування моделей мікромереж містить численні прогалини та колізії, втім, може бути основою для застосування бізнес-моделей управління мікромережами. В статті досліджено національне нормативно-правове забезпечення функціонування бізнес-моделей управління мікромережами. Результати досліджень бізнес-моделей управління мікромережами, а також необхідність усунення конфліктів інтересів гравців ринку обумовлюють необхідність розробки гармонізованих рольових моделей управління мікромережами залежно від нормативно-правових засад утворення і функціонування мікромережі та особливостей управління нею.

Суть управління мікромережею за DSOMM полягає у наділенні оператора мережі (оператора системи розподілу, ОСП, *Distribution System Operator*, DSO) широкими повноваженнями для управління мікромережею. Зазвичай, такі мікромережі розташовуються у географічно віддалених регіонах, де з техніко-економічних міркувань приєднання до загальної мережі є невиправданим. Рольову модель управління мікромережею за DSOMM наведено на рис. 1. Відповідно до запропонованої рольової моделі виробник, споживач та оператор установки зберігання енергії ОУЗЕ є сторонами, що приєднані до мережі

(СПМ), тобто фізичними або юридичними особами, які наділені правом відпускати або відбирати електроенергію до/з електричних мереж оператора системи (п.1.2.1 Кодексу комерційного обліку електричної енергії, ККОЕЕ [5]). Кожний учасник ринку електричної енергії є стороною, відповідальною за баланс (СВБ), проте, існують деякі винятки. Так, споживачі, що купують електроенергію за договором постачання електричної енергії у електропостачальника, не несуть відповідальність за власні небаланси (п.1.5.1 Правил ринку [6]), оскільки відповідно до ч.2 ст.70 Закону України “Про ринок електричної енергії” електропостачальники є СВБ своїх споживачів [1]. Крім того, будь-який учасник ринку електричної енергії може передати свою відповідальність за баланс іншій стороні за умови входження ним до балансувальної групи. Врегулювання небалансів здійснюється у взаємодії СВБ та оператора системи передачі (ОСП) відповідно до укладеного між ними договору.

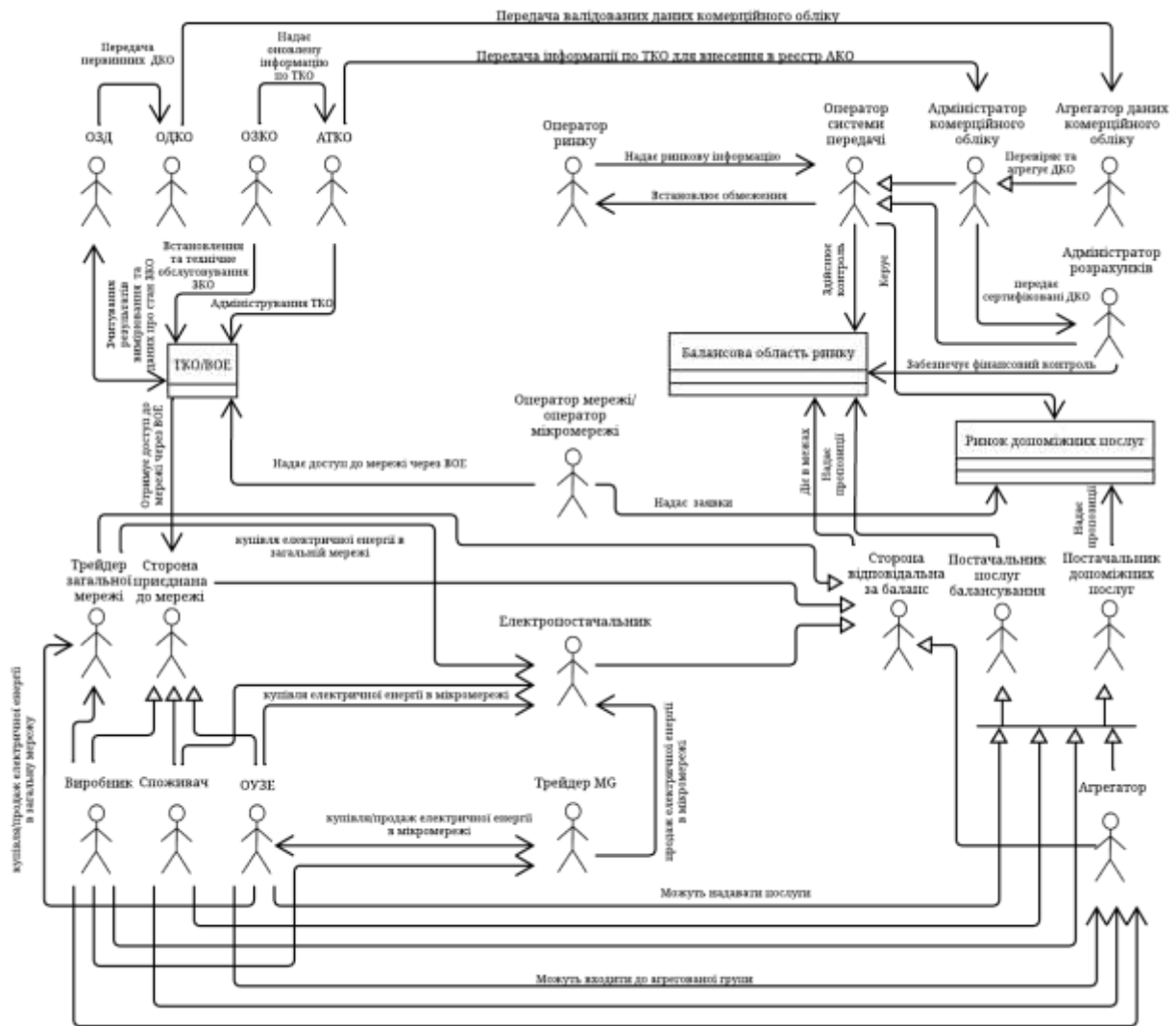


Рисунок 1 — Рольова модель управління мікромережею за DSOMM

Виробник, споживач та ОУЗЕ також можуть входити до агрегованої групи. При цьому одна електроустановка, що призначена для виробництва та/або споживання, та/або УЗЕ може входити лише до однієї одиниці агрегації, окрім електроустановок з встановленою потужністю понад 20 МВт, які відповідно до п.8 ст.30² Закону України «Про ринок електричної енергії» не можуть входити до складу одиниць агрегації [1].

Всі учасники ринку, які відповідно до Кодексу системи передачі (КСП) [7] володіють генерувальними одиницями типів В, С та D зобов'язані бути постачальниками послуг з балансування. Агрегатор зобов'язаний бути постачальником послуг балансування (ППБ) у разі управління ним генерувальними одиницями, що мають в складі одиниці відпуску із сумарною потужністю понад 1 МВт. Споживачі, ОУЗЕ та агрегатори, які не здійснюють управління одиницями відпуску, можуть стати ППБ на добровільних засадах (п.п.4.2.4-4.2.5 Правил ринку [6]). Балансувальний ринок (БР) електричної енергії

керований ОСП. З метою участі на БР учасник ринку подає заяву ОСП про наміри приєднання до нього та вноситься до реєстру ППБ. Оператор ринку (ОР) надає ОСП ринкову інформацію щодо результатів торгів на ринку «на добу наперед» (РДН) та внутрішньодобовому ринку (ВДР).

Як і на БР, участь на ринку допоміжних послуг (РДП) може бути як добровільною, так і обов'язковою. Власники генерувальних одиниць типу С та D, що були введені в експлуатацію після прийняття КСП, а також ті, що пройшли модернізацію та/або реконструкцію, зобов'язані мати технічну спроможність надання допоміжних послуг з резерву підтримки частоти (РПЧ), резерву відновлення частоти (РВЧ) та резерву заміщення (РЗ). Агрегатори, сумарна встановлена потужність яких складає 20 МВт і більше, також зобов'язані стати постачальником допоміжних послуг (ПДП) та пропонувати свої послуги з РПЧ, РВЧ та РЗ на аукціоні. Діяльність споживачів та ОУЗЕ на РДП є добровільною (п.п.3.1.5-3.1.6 Правил ринку [6]). РДП, як і БР керується ОСП. З цією метою ОСП забезпечує функціонування електронної платформи, де проводяться аукціони з приводу купівлі/продажу допоміжних послуг (ДП).

Споживачі та ОУЗЕ можуть закуповувати електричну енергію через електропостачальників як в мікромережі, так і в загальній мережі. Для здійснення цих дій споживачі мають бути вільними у виборі електропостачальників. Крім того, для споживачів, якими можуть бути і ОУЗЕ, існує можливість самостійно або через афільовану юридичну особу ставати електропостачальниками самим для себе, отримавши відповідну ліцензію для провадження такої діяльності. Проте, варто врахувати, що у разі закупівлі електричної енергії у трейдера мікромережі у першу чергу варто забезпечити електроенергією споживачів мікромережі, а надлишки можна реалізувати в загальній мережі.

Виробники та ОУЗЕ можуть продавати вироблену / накопичену електричну енергію як до мікромережі, так і до загальної мережі через трейдерів. Відповідно до п.92 ч.1 ст.1 Закону України «Про ринок електричної енергії» трейдерська діяльність характеризується закупівлею електричної енергії виключно з метою її перепродажу (окрім продажу електроенергії за договором постачання електричної енергії споживачу) [1]. Варто зазначити, що мікромережа функціонує, зокрема, з метою забезпечення приєднаних до неї споживачів електричною енергією в разі від'єднання мікромережі від загальної мережі (островізації). Саме тому вбачається доцільним поділ ролі трейдера на «трейдер мікромережі» та «трейдер мережі». Трейдер мікромережі може закуповувати електричну енергію у виробників як в мікромережі, так і в загальній мережі. Проте, першочерговим його завданням є продаж електричної енергії електропостачальникам, які забезпечують попит споживачів, приєднаних до мікромережі, і тому він має пріоритет під час закупівлі електричної енергії у виробників мікромережі. Трейдер мережі вільний у закупівлі електричної енергії у виробників мікромережі для загального ринку або ж перепродажу в мікромережі електричної енергії, закупленої у виробників загальної мережі.

Модель управління мікромережами РСs (рис.2) передбачає створення юридичного об'єднання споживачів, виробників і операторів установок зберігання енергії (ОУЗЕ) та передачу управління мікромережею агрегатору. На відміну від DSOMM, де ОСР має значний рівень монополії, у РС вагому роль відіграють саме виробники, споживачі (зокрема, активні користувачі) та ОУЗЕ.

Агрегатор здійснює діяльність, яка полягає в об'єднанні одиниць агрегації (генерування, навантаження та/або накопичення / зберігання) з метою закупівлі / продажу електричної енергії, постачання послуг балансування та/або допоміжних послуг. Відповідно до ч.2 ст.30² Закону України «Про ринок електричної енергії» агрегатор може агрегувати одну або декілька одиниць агрегації [1]. Активні споживачі здебільшого переслідують дві головні мети: максимізація прибутку шляхом продажу електричної енергії, виробленої власними генерувальними установками, або ж самозабезпечення своїх потреб. Виробники та ОУЗЕ можуть мати також два варіанти: або надавати право розпоряджатися виробленою / накопиченою електричною енергією агрегатору і вже він буде на власний розсуд її продавати та/або постачати ПБ та/або ДП. Інший варіант полягає в тому, що виробники та ОУЗЕ можуть самостійно продавати власну вироблену / накопичену електроенергію в оптовому ринку електроенергії (ОРЕ) та/або постачати послуги на БР та/або на РДП.

Виходячи з цього пропонується в межах управління мікромережею за моделлю РС створювати щонайменше дві агреговані групи (рис. 2). Перша агрегована група орієнтується на максимізацію прибутку, а отже виробники, споживачі та ОУЗЕ цілком покладаються на агрегатора та передають йому право розпоряджатися електричною енергією, що виробляється та/або зберігається учасниками, з метою одержання прибутку. Друга агрегована група орієнтується на максимальне забезпечення своїх потреб (для споживачів), а відносно виробників чи ОУЗЕ – на виконання попередньо обумовлених зобов'язань щодо продажу електричної енергії чи постачання ПБ та/або ДП, а надлишками електричної енергії можуть розпоряджатися на власний розсуд. Відповідно, виходячи з цілей учасників в конкретний період часу вони можуть входити та виходити з певної агрегованої групи, делегуючи право на розпорядження електричною енергією, що була вироблена власними генерувальними установками та/або збережена в УЗЕ або ж розпоряджатися нею самостійно.

Результати дослідження особливостей національної законодавчої бази стосовно енергетичних кооперативів, а саме: можливість їхнього утворення відповідно до Закону України «Про кооперацію» [8]

(виключно неприбуткові кооперативи) та Закону України “Про споживчу кооперацію” [9] (можливий варіант отримання прибутку), обумовлюють необхідність розробки двох різних ролевих моделей управління їхніми мікромережами. У випадку прибуткового енергетичного кооперативу доцільною бачиться модель РС. Що ж стосується неприбуткового кооперативу, то доцільно передбачити можливість закупівлі електричної енергії для споживача та ОУЗЕ у електропостачальника із загальної мережі (наприклад, коли обсяг генерації в межах мікромережі є недостатнім). Також варто передбачити роль трейдера, що дозволить виробникам та ОУЗЕ мікромережі продавати електричну енергію до загальної мережі (рис. 3).

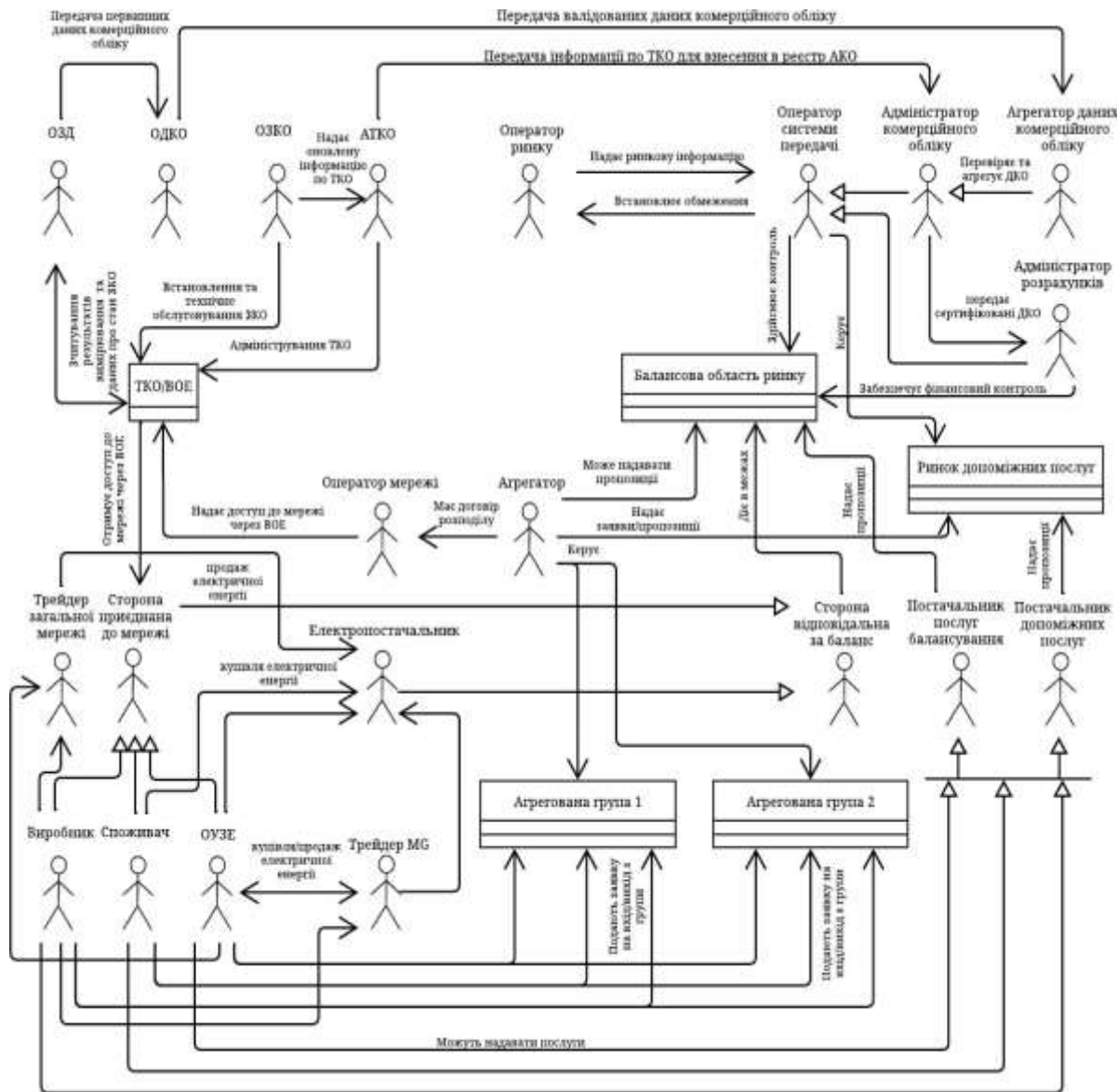


Рисунок 2 — Рольова модель управління мікромережею РС / прибуткового енергетичного кооперативу

Наявність ролей електропостачальника і трейдера всередині мікромережі є недоцільною через те, що споживачі можуть напряму обмінюватись електричною енергією з метою досягнення цілей кооперативу. Враховуючи те, що неприбутковий енергетичний кооператив не має на меті отримання прибутку, то можна стверджувати, що головною метою такого енергетичного кооперативу є надійне забезпечення споживачів електричною енергією, яку вироблено власними генерувальними установками.

Відповідно до ч.7-9 ст.58¹ Закону України “Про ринок електричної енергії” [1] активні споживачі зокрема, енергетичні кооперативи мають право приєднувати до власних мікромереж генерувальні установки та УЗЕ, що належать третім особам з метою подальшого викупу всього виробленого ними обсягу електричної енергії. При цьому продаж електричної енергії, що вироблена генерувальними установками третіх осіб та/або відпущена з УЗЕ за умови приєднання їх до мереж активного споживача не

вважається постачанням електричної енергії в розумінні Закону України “Про ринок електричної енергії” [1], а отже не потребує отримання ліцензії за умови не перевищення встановленої потужності приєднаних до мікромережі активного споживача генерувальних установок 5 МВт. Надлишки, які не було використано активним споживачем, продаються на ринку електричної енергії за механізмом самовиробництва. Що стосується європейського законодавства, то у п.43 Директиви 2019/944 вводиться таке поняття як “спільне використання електричної енергії” (“Community energy offers an inclusive option for all consumers to have a direct stake in producing, consuming or sharing energy”) [10]. Під спільним використанням електричної енергії, розуміється обмін електроенергією, що вироблена генерувальними установками в межах енергетичної спільноти. Крім того, п.46 Директиви 2019/944 дозволяє обмінюватись електроенергією не знаходячись в безпосередній фізичній близькості до генерувальної установки [6], але варто зазначити, що у такому випадку енергетичну спільноту не можна вважати мікромережею.

Модель вільного ринку FMM (рис. 4) характеризується максимальною свободою власників генерувальних одиниць в своїх діях. Мікромережі за FMM керуються виходячи з різних мотивів (економічних, технічних, екологічних тощо) заінтересованих сторін (ОСР, споживачів, агрегаторів) і заплановані режими функціонування мікромережі узгоджуються консенсусом залучених учасників щодобово в реальному часі [11].

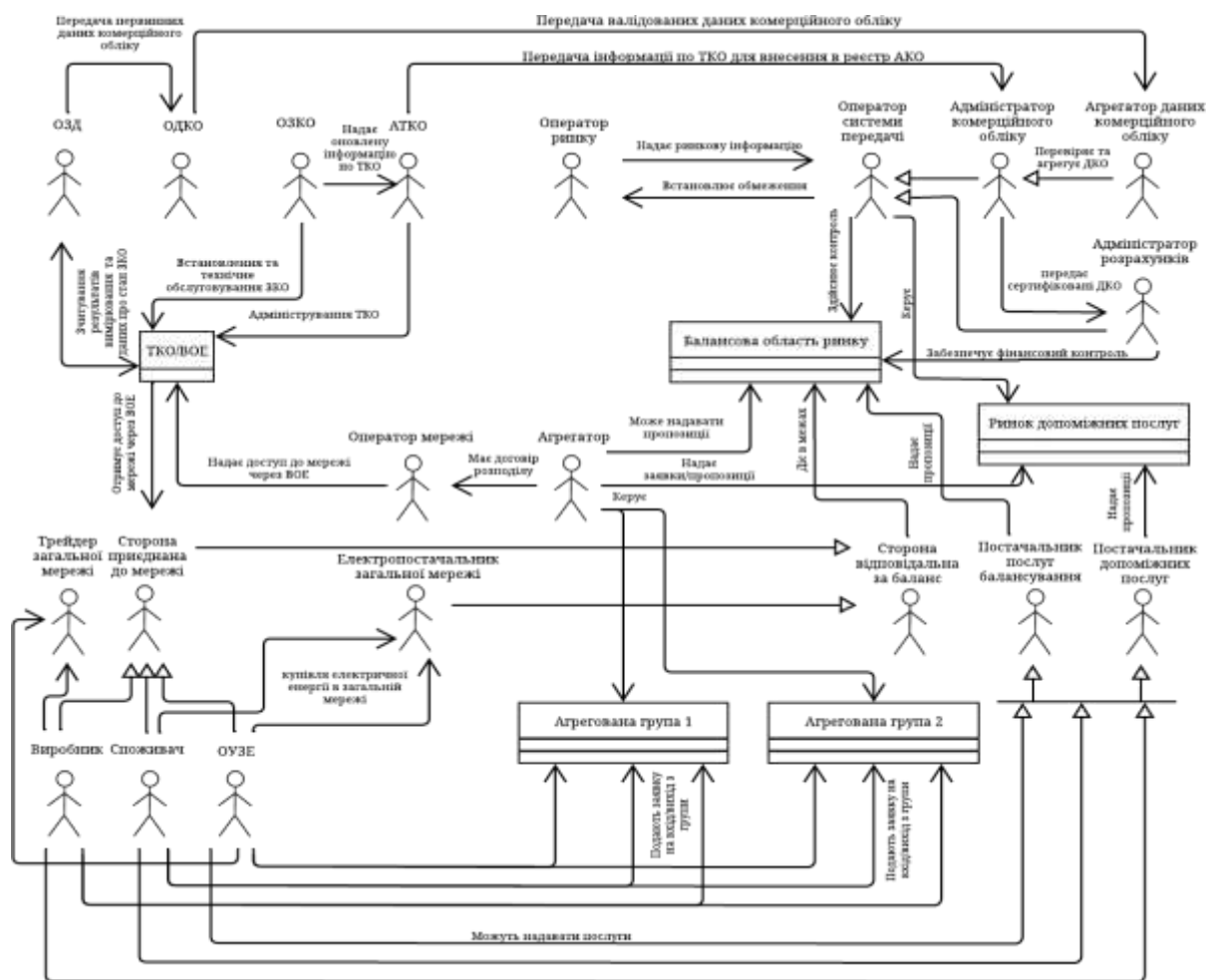


Рисунок 3 — Рольова модель управління мікромережею неприбуткового енергетичного кооперативу

За такого підходу власне операційне управління режимами з урахуванням результатів перемовин, що були досягнуті між гравцями, реалізується в автоматичному режимі центральним контролером мікромережі (*Microgrid Central Controller, MGCC*), який одночасно відповідає за баланс в мікромережі, здійснює контроль імпорту та експорту електричної енергії, забезпечує управління функціонуванням мікромережі, а також моніторинг рівня викидів. Таким чином, потенційні бенефіти за результатами функціонування мікромережі буде розподілено між усіма залученими учасниками на узгоджених умовах [12; 13].

Можна сказати, що FMM являє собою лібералізовану модель ринку електричної енергії у “мікро” масштабі. ОСР є єдиним і відокремленим від інших ролей та не може здійснювати діяльність з

виробництва, зберігання та постачання електричної енергії. Так, ОСР не може зловживати і зобов'язувати, наприклад, споживачів використовувати наявні джерела генерації в межах мікромережі для задоволення власних потреб (з метою уникнення впливу на режими розподільної мережі), коли ціни на загальному ринку електричної енергії є вигіднішими для споживачів. З іншого боку, управління мікромережею виключно споживачами, які зазвичай прагнуть передусім до економії витрат на електроенергію, може спричинити негативний вплив на режими розподільної мережі. Отже, FMM дозволяє врахувати інтереси всіх залучених сторін у максимально прозорий спосіб, але є вкрай складною для реалізації моделлю управління мікромережею.

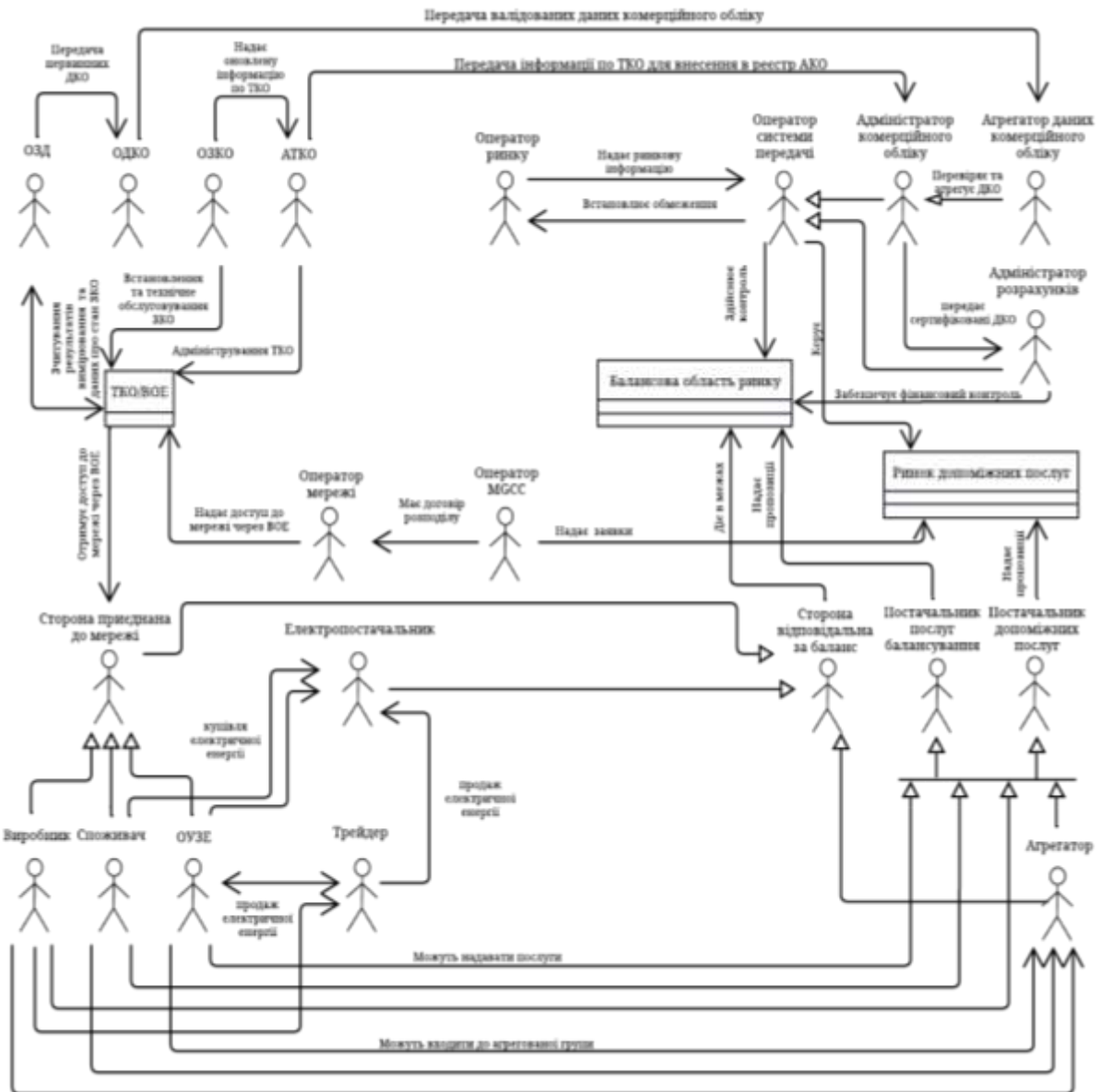


Рисунок 4 — Рольова модель управління мікромережею за FMM

Висновки. Розроблені рольові моделі управління мікромережами узгоджені із загальноприйнятою моделлю мікромережі консорціуму просюмерів і враховують особливості національного законодавства щодо мікромереж прибуткових та неприбуткових енергетичних кооперативів. Проте варто зазначити, що наявні численні невизначеності і прогалини стосовно енергетичних кооперативів, утворення і діяльність яких сьогодні регулюється на основі застарілої законодавчої бази, що стосується різних типів кооперативів: виробничих, обслуговувальних, споживчих. То ж продуктивне застосування мікромереж в Україні вимагає передусім вдосконалення національного нормативно-правового забезпечення процесів їхнього утворення і застосування. Розв'язання зазначеної проблеми дозволить збільшити продуктивність мікромереж та суттєво посилить їхню керованість, що сприятиме підвищенню стійкості об'єднаної електроенергетичної системи України.

Список використаної літератури

1. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13 квіт. 2017 р. № 2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (дата звернення: 20.05.2024).
2. Висновок на проект Закону України “Про внесення змін до деяких законів України щодо врегулювання окремих питань використання термінології у сфері впровадження “розумних мереж”. URL: <https://itd.rada.gov.ua/billInfo/Bills/pubFile/2283863> (дата звернення: 20.05.2024)
3. Behrendt, J. (2023). Microgrids and EU law: Three Microgrid models to solve one regulatory puzzle, *Energy Policy*, Elsevier, vol. 177(C). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142152300068X>
4. Коцар О.В., Касьяненко Є.О. Аналіз моделей управління microgrid в національному законодавчому та регуляторному просторі // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2024. – № 3. – С. 110–124. URL: <https://energy.kpi.ua/issue/view/18520/11474>
5. Про затвердження Кодексу комерційного обліку електричної енергії: Постанова НКРЕКП № 311 від 14.03.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18/ed20240112#Text> (дата звернення: 05.06.2024)
6. Про затвердження Правил ринку: Постанова НКРЕКП № 307 від 14.03.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18> (дата звернення: 30.05.2024)
7. Про затвердження Кодексу системи передачі: Постанова НКРЕКП № 309 від 14.03.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> (дата звернення: 05.06.2024)
8. Про кооперацію: Закон України від 10 лип. 2003 р. № 1087. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1087-15#Text> (дата звернення: 25.05.2024).
9. Про споживчу кооперацію: Закон України від 10 квіт. 1992 р. № 2265. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2265-12#Text> (дата звернення: 25.05.2024)
10. Про спільні правила внутрішнього ринку електроенергії та внесення змін до Директиви 2012/27/ЄС: Директива Європейського парламенту і Ради (ЄС) 2019/944 від 05 черв. 2019 р. URL: <https://energysecurityua.org/ua/brify/dyrektyva-yes-2019-944-yevropeyskoho-parlamentu-i-rady-vid-05-cheravnia-2019-roku/> (дата звернення: 20.10.2024);
11. Hatziaargyriou, Nikos. (2014). Microgrids: Architectures and Control. URL: <http://www.microgrids.eu/documents/682.pdf> (дата звернення: 20.10.2024)
12. Ferruzzi, Gabriella & Graditi, G.. (2017). Optimal Scheduling of a Microgrid under Uncertainty Condition. URL: https://www.researchgate.net/profile/Gabriella-Ferruzzi-2/publication/346836386_Optimal_Scheduling_of_a_Microgrid_under_Uncertainty_Condition/links/5fd8da58a6fdccdb8cc7f2d/Optimal-Scheduling-of-a-Microgrid-under-Uncertainty-Condition.pdf (дата звернення: 20.10.2024)
13. Mariya Soshinskaya, Wina H.J. Crijns-Graus, Josep M. Guerrero, Juan C. Vasquez, Microgrids: Experiences, barriers and success factors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 40, 2014, Pages 659-672. URL: https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/201870862/Paper_barriers_microgrid.pdf (дата звернення: 20.10.2024)

O. Kotsar¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-7958-2335

Ye. Kasianenko¹, магістрант, ORCID 0009-0008-6704-6616

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

MICROGRID MANAGEMENT ROLE MODELS

Decentralization processes are accompanied by the transformation of traditional distribution networks into the active distribution systems, into which balanced microgrids are integrated, containing microgeneration units mainly based on alternative and renewable energy sources, loads and energy storage units. Management of active distribution systems requires fundamentally new conceptual approaches, which should take into account, in particular, the basic principles of microgrid formation and business models for their management. The paper examines business models and describes the developed role models for microgrid management according to DSOMM, PC, FMM, and also identifies the features of the national regulatory and legal support for the processes of formation and functioning of energy cooperatives, which determined the expediency of developing separate role models for microgrid management of profitable and non-profit energy cooperatives. References 13. Figures 4.

Keywords: active consumer, CDS, CEC, DSOMM, energy cooperative, FMM, MCP, microgrid, microgrid model, microgrid management model, PC, prosumer, role model.

References

1. On the electric energy market: Law of Ukraine dated April 13 2017 No. 2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (accessed at: 05/20/2024).
2. Conclusion on the draft Law of Ukraine "On Amendments to Some Laws of Ukraine Regarding the Regulation of Certain Issues of the Use of Terminology in the Field of Implementation of "Smart Networks"". URL: <https://itd.rada.gov.ua/billInfo/Bills/pubFile/2283863> (accessed at: 05/20/2024)
3. Behrendt, J. (2023). Microgrids and EU law: Three Microgrid models to solve one regulatory puzzle, *Energy Policy*, Elsevier, vol. 177(C). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142152300068X>
4. Kotsar O.V., Kasianenko Ye.O. Analysis of microgrid management models in the national legislative and regulatory space // *Energy: economics, technologies, ecology*, 2024. – No. 3. – P. 110–124. URL: <http://energy.kpi.ua/issue/view/18520/11474>
5. On approval of the Code of Commercial Electricity Accounting: Resolution of the National Commission for the Regulation of the National Energy Regulatory Commission No. 311 of 14.03.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18/ed20240112#Text> (access date: 05.06.2024)
6. On approval of the Market Rules: Resolution of the National Commission for the Regulation of the National Energy Regulatory Commission No. 307 of 14.03.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18> (access date: 30.05.2024)
7. On approval of the Transmission System Code: Resolution of the National Commission for the Regulation of the National Energy Regulatory Commission No. 309 of 14.03.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> (access date: 05.06.2024)
8. On cooperation: Law of Ukraine dated July 10 2003 No. 1087. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1087-15#Text> (accessed at: 05/25/2024).
9. On consumer cooperation: Law of Ukraine dated April 10 1992 No. 2265. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2265-12#Text> (accessed at: 05/25/2024)
10. On common rules of the internal electricity market and amendments to Directive 2012/27/EU: Directive of the European Parliament and of the Council (EU) 2019/944 of June 5. 2019 URL: <https://energysecurityua.org/ua/brify/dyrektyva-yes-2019-944-yevropeykoho-parlamentu-i-rady-vid-05-chervnia-2019-roku/> (accessed at: 10/20/2024)
11. Hatzigrygiou, Nikos. (2014). Microgrids: Architectures and Control. URL: <http://www.microgrids.eu/documents/682.pdf> (accessed at: 20.10.2024)
12. Ferruzzi, Gabriella & Graditi, G. (2017). Optimal Scheduling of a Microgrid under Uncertainty Condition. URL: https://www.researchgate.net/profile/Gabriella-Ferruzzi-2/publication/346836386_Optimal_Scheduling_of_a_Microgrid_under_Uncertainty_Condition/links/5fd8da58a6fdccdb8cc7f2d/Optimal-Scheduling-of-a-Microgrid-under-Uncertainty-Condition.pdf (accessed at: 20.10.2024)
13. Mariya Soshinskaya, Wina H.J. Crijns-Graus, Josep M. Guerrero, Juan C. Vasquez, Microgrids: Experiences, barriers and success factors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 40, 2014, Pages 659-672. URL: https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/201870862/Paper_barriers_microgrid.pdf (accessed at: 20.10.2024)

Надійшла: 11.12.2024

Received: 11.12.2024

IMPROVING THE COMPETITIVE STRUCTURE OF THE DISTRICT HEATING MARKET THROUGH ENERGY STORAGE DEVICES

This research article explores the modernization of structural frameworks in district heating systems (DHSs) operating under competitive market conditions by integrating energy storage devices (ESD). Recognizing the necessity to enhance operational flexibility and reliability, particularly with the increasing share of intermittent renewable energy sources like wind and solar, the study investigates the role of ESD in optimizing DHS functionalities. The primary objectives include conducting a literature review to identify effective technologies for DHS integration and proposing an upgraded structural interaction scheme tailored to competitive environments. The literature review highlights the potential of various thermal energy storage (TES) solutions, each contributing to enhanced energy management despite inherent economic and technical challenges. The proposed modernization of structural schemes redefines the roles of multiple actors in the DHS, including energy producers, transportation networks, and consumers, alongside operations management. By facilitating demand response and adapting pricing structures, the competitive DHS environment aims to reduce reliance on fossil fuels and enhance the viability and resilience of energy networks. In conclusion, this research underscores the transformative impact of integrating ESD into DHSs, promoting sustainable urban energy infrastructures that align with global sustainability objectives. Continued innovation, coupled with strategic policy support, is essential to overcome existing barriers and fully exploit the potential of ESD in modernizing district heating frameworks for resilient and economically viable energy solutions.

Keywords: district heating, DH market, energy storage, renewable energy sources, grid stability.

Introduction

The ongoing evolution of energy systems worldwide is driven by the imperative to enhance efficiency, minimize environmental impacts, and integrate a greater proportion of renewable energy sources into existing infrastructures. This transformation is particularly relevant to district heating systems (DHSs), which are crucial components of urban energy distribution networks. DHSs stand poised for significant modernization reforms, especially under competitive market conditions where the integration of energy storage devices (ESD) emerges as a critical enabler [1]. The drive for such modernization stems from an urgent need to address the challenges posed by the growing share of intermittent renewable energy sources (RES) like wind and solar power [2, 3]. Fig. 1 illustrates the trend in the increasing share of renewable energy sources in the European Union [4].

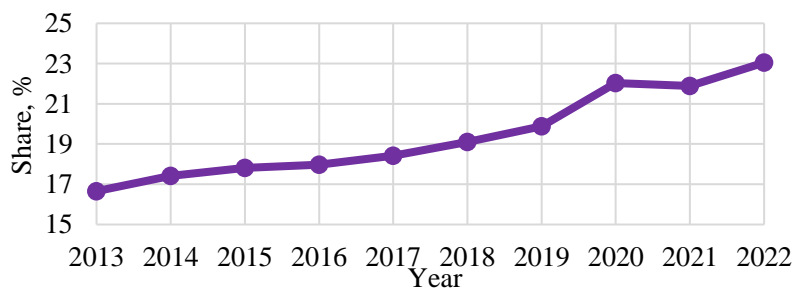


Figure 1 - Share of energy from renewable sources (European Union - 27 countries)

The integration of ESD into DHSs facilitates greater operational flexibility and reliability by enabling these systems to store surplus energy generated during peak periods of renewable energy production for use during demand peaks or low production phases. This capability addresses the inherent variability and intermittency associated with renewable energy, thus ensuring a stable and reliable energy supply [5, 6]. As urban centers transition towards a more sustainable energy landscape, exemplified by initiatives striving for 100% renewable energy, the strategic role of DHSs equipped with advanced energy storage cannot be overstated [7]. Structured approach of understanding the use of energy storage within a DHSs presented in Fig. 2.

Furthermore, the modernization of DHSs through energy storage solutions aligns with the global emphasis on sustainability as outlined in international accords like the Paris Climate Agreement. By reducing reliance on fossil fuels and enhancing energy efficiency, DHSs contribute not only to reduced greenhouse gas emissions but also to more resilient and economically viable energy networks [8]. This broader transition is supported by comprehensive research efforts focusing on the development of innovative techno-economic models designed to

integrate energy storage technologies effectively into DHS frameworks, thus optimizing their interaction with various entities within the microgrid system under competitive settings [9].

The drive towards integrating ESD within DHSs is further motivated by the need to enhance energy security and economic efficiency across European electricity markets, particularly in balancing services sectors where DHSs can serve as pivotal contributors [10, 11]. Technologies such as combined heat and power (CHP) systems and power-to-heat (P2H) systems can extend the role of DHSs beyond traditional heat delivery, enabling them to provide valuable balancing services that maintain grid stability amid increased RES penetration. However, achieving these objectives requires strategic advancements in energy storage technologies and structural modernizations that address the unique needs of competitive DHS environments [12, 13].

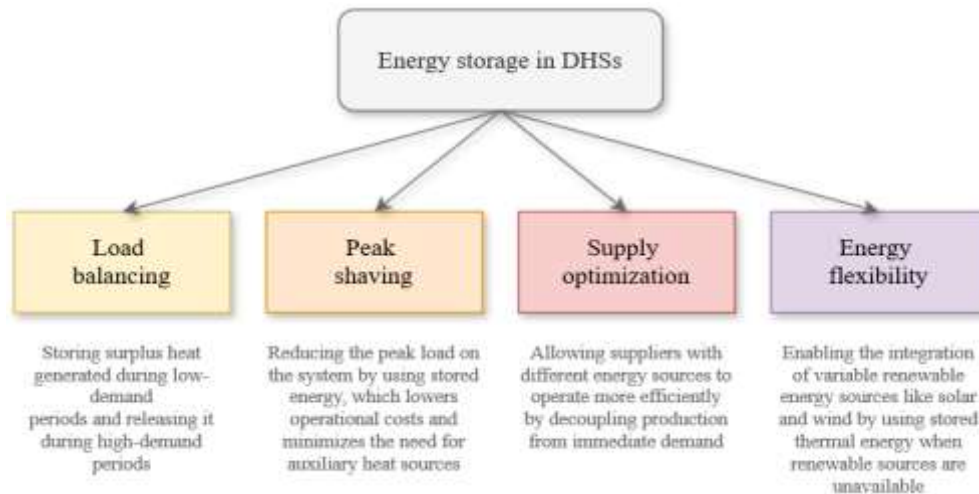


Figure 2 - Structured approach of understanding the use of energy storage within a DHSs

Research [10] highlights that regions with advanced district heating infrastructure hold significant untapped potential for integrating ESD to facilitate energy balancing services, although this prospect is often underestimated due to data limitations and country-specific implementations. Overcoming such challenges requires not just technological innovation but also comprehensive reviews and adaptations of energy service frameworks, ensuring these systems cater to the diverse and evolving requirements of modern energy markets [9, 13].

The modernization of structural schemes in DHSs through the incorporation of ESD is a pivotal aspect of current research focused on transforming urban energy systems to meet the demands of a sustainable future. This integration promises not only to enhance operational efficiency and reduce emissions but also to redefine service delivery frameworks in competitive environments, aligning local urban systems with broader global efforts towards renewable and resilient energy infrastructures. This research aims to significantly contribute to the development of modern DHS structures, leveraging storage technologies to foster innovative solutions for sustainable urban energy management [8, 13].

The purpose of this research is to improve the competitive structure of the district heating market through energy storage devices. To achieve this goal, the following tasks must be completed:

1. Conduct a literature review on the application of ESDs to identify the most effective technologies for integration into DHSs.
2. Propose upgraded structural scheme of interaction among entities in the competitive DHS using energy storage.

1. Overview of promising energy storage technologies in DHSs. Modern DHSs face the dual challenges of increasing efficiency and reducing environmental impact. As the energy landscape shifts towards sustainability, integration of ESDs has emerged as a pivotal strategy in enhancing the flexibility, reliability, and efficiency of DHSs. This literature review encapsulates various studies focusing on the application and integration of advanced energy storage solutions in DHSs to address these challenges.

One of the primary focuses in the field is on improving energy storage methodologies, particularly through various forms of thermal energy storage (TES) systems. Borehole thermal energy storage (BTES) is recognized for its potential to integrate with fifth-generation district heating and cooling systems, offering cost-effective and environmentally friendly solutions that help in balancing the time gap between energy supply and demand [14]. Underground Thermal Energy Storage (UTES), which includes aquifer, borehole, reservoir, and ground heat exchangers, is emphasized for its capacity to optimize load sharing and enhance system flexibility, contributing significantly to the decarbonization of heating and cooling processes [15]. Similarly, large-scale thermal ESDs, such as pit and tank TES, are crucial in capitalizing on renewable energy potential while reducing curtailment [16].

The coupling of biomass-fueled Combined Heat and Power (BCHP) systems with DHSs, augmented by thermal energy storage, represents an optimization pathway for energy systems, promising enhanced reliability and reduced environmental footprint, specifically under competitive market conditions [17]. The integration of power-to-heat technologies, including electric boilers combined with TES, facilitates enhanced flexibility in CHP plants, reducing reliance on fossil fuels while supporting smoother load balancing within 4th generation district heating frameworks [18, 19]. Furthermore, the implementation of photovoltaic thermal (PVT) systems along with TES infrastructures presents a promising advancement in urban heating solutions, underscoring both current applicability and future prospect potentials as discussed by recent reviews [16, 20].

Decentralized storage solutions, particularly innovative control strategies for domestic hot water (DHW) needs demonstrate energy savings and reduced thermal losses, marking significant advancements in distributed storage technologies [21, 22]. In parallel, short-term TES solutions help district heating networks provide flexibility and ancillary services to the electricity grids, thereby harnessing potential benefits in fluctuating energy markets in regions like Europe and China [23]. The integration of building-induced demand response strategies alongside centralized TES further indicates avenues for optimization, economizing on peak loads and heating generation costs [24].

A techno-economic evaluation of hybrid TES geometries has shown promising results in optimizing cost and performance, offering guidelines on the economic viability of large-scale TES applications in DHSs [25]. The integration of thermal storage with building-scale photovoltaics and ground source heat pumps further affirms the importance of storage in optimizing energy management and cost-efficiency under market-based conditions [26]. Moreover, the combination of TES with strategic demand-side management approaches helps address uncertainties, reducing operational costs and emissions, thus enhancing system performance under market constraints [27].

Recent reviews and analyses underline the importance of strategic TES integration with HVAC systems, comparing various configurations and emphasizing the management of thermal distribution networks to maximize system efficiency and renewable integration [28, 29]. The deployment of water tank TES, specifically for prosumer economic performance, further illustrates significant cost savings and operational optimization potential, thereby underlining the competitive edge TES can provide within DHSs [30].

Based on the reviewed literature, the most promising energy storage technologies for DHSs were classified and their features, pros and cons were defined and presented in Table 1.

Table 1. Promising ESD technologies for competitive DHSs.

ESD type	Features	Pros	Cons
Borehole thermal energy storage (BTES)	Utilizes the ground's subsurface for storing thermal energy via deep boreholes	Environmentally friendly, long-term storage capabilities, and reduces greenhouse gas emissions.	High initial setup costs and site-specific dependency on geological conditions
Pit thermal energy storage (PTES)	Utilizes insulated, large-scale pits to store heat, often as water or gravel-water mixtures	Economically viable on a large scale and efficient for seasonal storage	Large land use footprint and high initial construction costs
Aquifer thermal energy storage (ATES)	Stores and retrieves heat from groundwater in aquifers	Large capacity potential and minimal surface disruption	Site-specific limiting factors due to geological requirements and potential environmental impacts
Sensible heat storage (SHS)	Stores thermal energy by changing the temperature of a liquid or solid media, commonly water or rocks	Cost-effective and reliable with ease of use	Requires significant space for large storage volumes
Phase change materials (PCM) storage	Uses materials that absorb or release heat during phase transitions, such as melting or solidification	High energy density and reduced storage volume	Higher costs and technical complexity during installation
Battery energy (BES)	Stores electrical energy by creating a potential difference between lithium ions	High energy density, fast response times, long cycle life, and scalability	Costly and power limited compared to thermal solutions
Chemical energy storage (CES)	Involves storing energy through reversible chemical reactions	High energy density and long-term storage without energy losses	Low technology maturity and high operational costs

Overall, the integration of ESDs in district heating frameworks not only addresses immediate operational efficiencies but also lays a foundation for future advancements in sustainable urban energy networks. The consistent theme across the literature echoes the critical role that TES technologies play in enhancing the

adaptability and eco-friendliness of modern DHSs while navigating complex market and competitive environments. This body of work serves as a reference point for ongoing research and development aimed at fine-tuning these storage integrations to meet future energy demands efficiently and sustainably.

2. Modernization of structural scheme of interaction among entities in a competitive DH market based on ESDs. The need for modernization of the structural scheme of competitive DHS presented in [31, 32] arises from several factors. The integration of renewable energy is increasingly essential in today's DHS, as sustainability goals call for cleaner energy sources. Advanced demand response capabilities and energy storage are increasingly necessary to efficiently handle fluctuating demand, especially with the rise of intermittent RES. Enhancing these features in the previous scheme would improve energy efficiency and system stability, supporting a more dynamic balance between supply and demand. Decentralized management aligns well with the growing complexity of modern energy networks. Such a structure allows the system to distribute responsibilities across multiple operators, making it easier to respond to changes in demand and balance loads efficiently. This approach also supports a consumer-centric model by giving end-users more influence over their energy consumption and costs. Modernizing the DHS to focus on consumer engagement and adaptable pricing could encourage energy-saving behavior and boost satisfaction.

The proposed basic scheme in Fig. 3 illustrates a competitive DHS in which multiple actors are involved in producing, transporting, consuming, and managing energy. The system is divided into four main groups: the energy production group, the energy transportation group, the energy consumption group, and the DHS operations group.

The energy production group consists of several entities that generate thermal and electric energy. The CHP producer plays a dual role by supplying both electric and thermal energy. Electricity produced by the CHP is directed to the electricity market, facilitating the balancing of electric supply and demand. Independent energy producers, including RES and other independent thermal energy producers, contribute thermal energy to the system, which is essential in a competitive environment. A major player in this group is the main thermal energy producer, who supplies significant amounts of thermal energy to the network.

The energy transportation group is primarily managed by the thermal energy network organization, which serves as the central entity for distributing thermal energy across the network. This organization receives thermal energy from various producers, including both independent and main thermal energy producers. It ensures efficient distribution to meet consumer demand and works in close collaboration with energy storage to balance supply and demand fluctuations. Energy storage plays a critical role by absorbing excess energy during low-demand periods and releasing it when demand peaks, thereby stabilizing the network and optimizing resource utilization.

Consumers are represented in the energy consumption group, where buildings or other end-users receive thermal energy through the thermal network. Consumers rely on this energy for heating and other applications, making them the final link in the energy flow chain. Cash flows from consumers to the DHS operations group, highlighting the financial transactions necessary to sustain the energy supply chain.

The DHS operations group encompasses several crucial roles that ensure the stability and efficiency of the system. The system operator is responsible for maintaining overall network stability, overseeing the smooth operation of the energy flows and balancing them as needed. The energy storage operator manages the energy storage facilities, collaborating closely with the thermal energy network to help balance demand and supply. This group also includes the market operator, who oversees the trading of thermal energy, creating a competitive environment that benefits both producers and consumers. Finally, the demand response coordinator is tasked with managing demand response mechanisms, encouraging consumers to adjust their energy consumption patterns based on system conditions. This helps alleviate demand peaks and prevents potential strain on the system.

Thermal energy flows from various producers to the thermal network organization, which distributes it to consumers, representing the core functionality of the DHS. In parallel, the CHP supplies electric energy to the electricity market, adding value and efficiency to the system. Cash flows indicate the financial interactions between consumers and the DHS operations, while system control and management flows reflect the communication and coordination among different operators and the network organization. These management flows are essential for ensuring that the system operates in a synchronized manner.

In competitive conditions, multiple energy producers vie to supply thermal energy to the network, incentivizing efficiency and potentially lowering energy costs for consumers. The integration of energy storage adds flexibility, allowing excess thermal energy to be stored and used during periods of high demand. The market operator plays a key role in maintaining a fair and efficient trading environment, while the demand response coordinator's involvement helps manage peak loads and prevent system overload. The system operator oversees these interactions, ensuring that the DHS remains stable and reliable despite the complexities of competition and varying energy demands.

Discussion

The integration of ESD into competitive DHSs presents significant potential to enhance operational efficiency, increase system flexibility, and reduce environmental impact, aligning with broader sustainability goals. One of the primary technological advancements outlined is the strategic integration of TES systems, such

as BTES, PTES, and ATES. These technologies offer substantial promise in addressing the inherent variability of RES, such as solar and wind, by providing reliable energy storage solutions that bridge supply-demand gaps. However, challenges such as high initial costs and site-specific geological dependencies present barriers that necessitate further innovation and refinement. The incorporation of PCM also highlights an innovative avenue for enhancing energy density and reducing required storage volumes, albeit with associated technical complexities. Moreover, BESS and CES add a new dimension by enabling electrical energy storage, although they are often costly and require advancements in technology maturity to be viable on a larger scale. These systems, in conjunction with TES, broaden the scope of energy storage options available to DHSs, potentially enabling more nuanced and efficient energy management strategies.

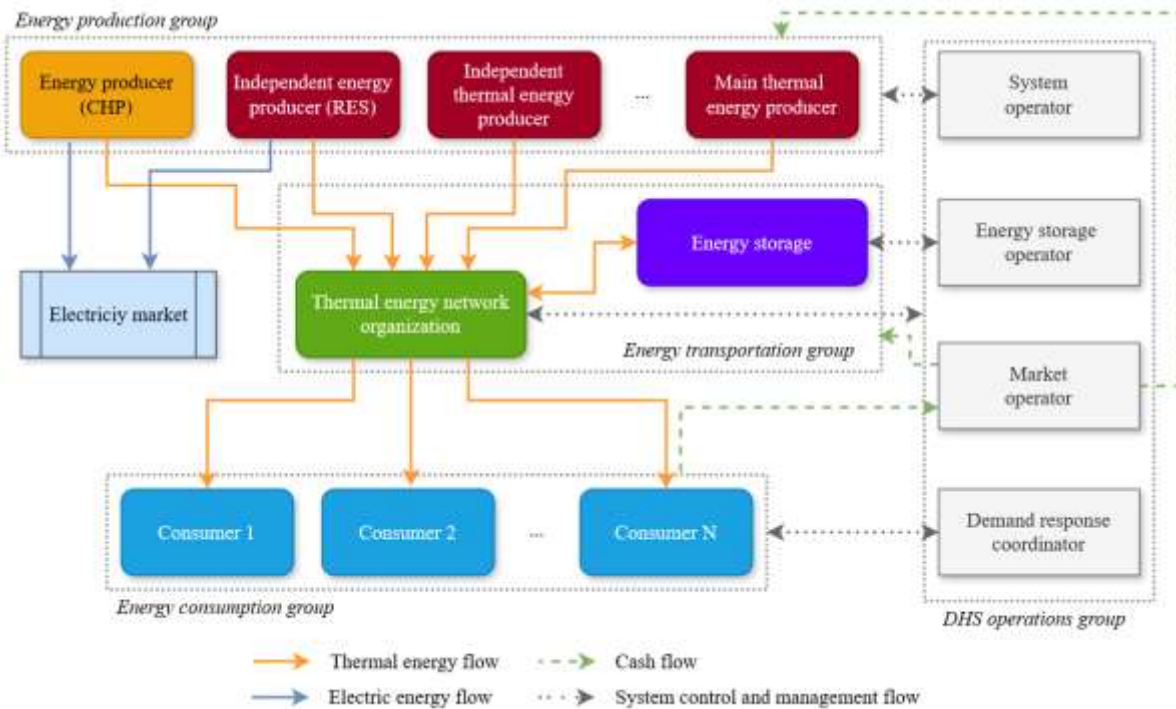


Figure 3 – Basic modernization of the structural scheme of the competitive DHS with ESD

From an economic standpoint, utilizing ESD in competitive DHSs promises to reduce operational costs and enhance grid stability. The proposed structural scheme fosters a multi-actor competitive environment where various energy producers contribute to a dynamic energy marketplace. By facilitating demand response and allowing for a more decentralized system management approach, DHSs can better optimize pricing structures and encourage energy-saving behaviors among consumers. Strategically, the integration of ESD supports a shift towards a consumer-centric model, enhancing end-user engagement and satisfaction. Additionally, by capitalizing on technologies like CHP, DHSs can extend their roles within energy networks, providing valuable balancing services that maintain grid reliability amidst increased RES penetration. This, in turn, enhances energy security and bolsters the economic viability of DHSs in competitive settings, where efficient energy management is crucial.

Despite the clear benefits, several challenges must be addressed. The complex interplay between different technological components requires careful coordination and management, demanding robust control systems and strategic planning. The financial implications, particularly concerning initial investment costs and economic feasibility in diverse geographical contexts, need in-depth analysis.

Looking towards future research directions, the scheme laid out can be explored through various alternative structural configurations. Given the diverse potential interactions between energy storage, producers, and consumers, further studies could focus on optimizing these relationships to maximize efficiency, economic, and environmental outcomes. Additionally, advanced modeling and simulation techniques could be applied to analyze the impact of various ESD integration strategies under different market and regulatory scenarios, providing critical insights for policymakers and industry stakeholders.

Additionally, ongoing advancements in smart grid technologies and real-time data analytics will play pivotal roles in refining these systems. As DHS operations become more data-driven, integrating advanced analytics and machine learning could lead to more accurate forecasts and better demand-supply matching, thereby enhancing overall system performance.

Conclusions

The modernization of competitive DHSs through the integration of ESD represents a critical advancement towards achieving a sustainable, efficient, and flexible urban energy infrastructure. This research confirms that the incorporation of promising energy storage technologies, such as TES and other advanced storage solutions, significantly enhances the operational capacity and adaptability of modern DHSs. By enabling more effective management of the variability and intermittency associated with RES, ESDs are essential for ensuring a stable and reliable energy supply.

Through a comprehensive literature review, this study identified key technologies that stand out for their potential to improve DHS performance. TES solutions like BTES, PTES, and ATES emerge as particularly effective, though initial costs and geological dependencies pose challenges that need strategic consideration.

The proposed structural scheme illustrates a dynamic interaction model among various entities within a competitive DHS, encompassing energy producers, transportation networks, and consumption sectors, alongside robust operations management facilitated by a market operator and a demand response coordinator.

The shift towards a decentralized and consumer-centric model promotes energy-saving behaviors and enhances user engagement, aligning with global sustainability efforts and reducing greenhouse gas emissions. Energy storage, particularly in conjunction with CHP technologies, offers the dual benefit of maintaining energy security and providing valuable balancing services to the electrical grid, thereby reinforcing the critical role DHSs play in modern energy networks.

In summary, this research underscores the transformative capacity of ESD in DHSs, positioning these systems at the forefront of sustainable urban energy solutions. Continued innovation and strategic integration of these technologies will be vital in catering to evolving energy demands and meeting stringent environmental targets globally.

References

- 1.I. Buratynskiy, T. Nechaieva, and I. Leshchenko, 'Assessment of the economic efficiency of battery energy storage systems in the electricity market segments', in *Studies in Systems, Decision and Control*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 37–50.
- 2.V. Derii, T. Nechaieva, and I. Leshchenko, 'Assessment of the effect of structural changes in Ukraine's district heating on the greenhouse gas emissions', *Sci. Innov.*, vol. 19, no. 4, pp. 57–65, Aug. 2023.
- 3.V. Babak and M. Kulyk, 'Increasing the efficiency and security of Integrated Power System operation through heat supply electrification in Ukraine', *Sci. Innov.*, vol. 19, no. 5, pp. 100–116, Oct. 2023.
- 4.Eurostat. doi:10.2908/NRG_IND_REN.
- 5.V. Denysov, V. Babak, A. Zaporozhets, T. Nechaieva, G. Kostenko, Energy System Optimization Potential with Consideration of Technological Limitations (August 23, 2024). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4936175>.
- 6.Hotra O, Kulyk M, Babak V, Kovtun S, Zgurovets O, Mrocza J, Kisała P, 'Organisation of the structure and functioning of self-sufficient distributed power generation', *Energies*, vol. 17, no. 1, p. 27, Dec. 2023.
- 7.J. Z. Thellufsen *et al.*, 'Smart energy cities in a 100% renewable energy context', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 129, no. 109922, p. 109922, Sep. 2020.
- 8.T. T. Sebestyén, M. Pavičević, H. Dorotić, and G. Krajačić, 'The establishment of a micro-scale heat market using a biomass-fired district heating system', *Energy Sustain. Soc.*, vol. 10, no. 1, Dec. 2020.
- 9.H. Bielokha, L. Chupryna, S. Denisyuk, T. Eutukhova, and O. Novoseltsev, 'Hybrid Energy Systems and the Logic of Their Service-Dominant Implementation: Screening the Pathway to Improve Results', *Energy Eng.*, vol.120, no.6, 2023, pp.1307-1323. <https://doi.org/10.32604/ee.2023.025863>
- 10.A. Boldrini, J. P. Jiménez Navarro, W. H. J. Crijns-Graus, and M. A. van den Broek, 'The role of district heating systems to provide balancing services in the European Union', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 154, no. 111853, p. 111853, Feb. 2022.
- 11.V. O. Derii, V. D. Bilodid, 'Limiting possibilities of the accumulation of thermal energy in centralized heat supply systems', *Probl. Gen. Energy*, vol. 2019, no. 2, pp. 41–45, Jun. 2019.
- 12.V. V. Horskyi, O. Y. Maliarenko, N. Y. Maistrenko, O. I. Teslenko, and H. O. Kuts, 'Modified three-stage model for forecasting the demand for energy resources at various hierarchy levels of the economy', *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1049, no. 1, p. 012054, Jun. 2022.
- 13.E. Guelpa, A. Bischi, V. Verda, M. Chertkov, and H. Lund, 'Towards future infrastructures for sustainable multi-energy systems: A review', *Energy (Oxf.)*, vol. 184, pp. 2–21, Oct. 2019.
- 14.H. Sadeghi, R. Jalali, and R. M. Singh, 'A review of borehole thermal energy storage and its integration into district heating systems', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 192, no. 114236, p. 114236, Mar. 2024.
- 15.N. Fry, P. Adebayo, R. Tian, R. Shor, and A. Mwesigye, 'A review of district energy technology with subsurface thermal storage integration', *Geotherm. Energy*, vol. 12, no. 1, Aug. 2024.
- 16.I. Sifnaios, D. M. Sneum, A. R. Jensen, J. Fan, and R. Bramstoft, 'The impact of large-scale thermal energy storage in the energy system', *Appl. Energy*, vol. 349, no. 121663, p. 121663, Nov. 2023.
- 17.M. Rezaei, M. Sameti, and F. Nasiri, 'Biomass-fuelled combined heat and power: integration in district heating and thermal-energy storage', *Clean Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 44–56, Mar. 2021.
- 18.K. Lepiksaar, V. Mašatin, E. Latšov, A. Siirde, and A. Volkova, 'Improving CHP flexibility by integrating thermal energy storage and power-to-heat technologies into the energy system', *Smart Energy*, vol. 2, no. 100022, p. 100022, May 2021.

- 19.N. Javanshir, S. Syri, S. Tervo, and A. Rosin, 'Operation of district heat network in electricity and balancing markets with the power-to-heat sector coupling', *Energy (Oxf.)*, vol. 266, no. 126423, p. 126423, Mar. 2023.
- 20.A. Kang, I. Korolija, and D. Rovas, 'Photovoltaic Thermal District Heating: A review of the current status, opportunities and prospects', *Appl. Therm. Eng.*, vol. 217, no. 119051, p. 119051, Nov. 2022.
- 21.D. Wang, J. Carmeliet, and K. Orehounig, 'Design and assessment of district heating systems with solar thermal prosumers and thermal storage', *Energies*, vol. 14, no. 4, p. 1184, Feb. 2021.
- 22.E. Bellos *et al.*, 'Dynamic investigation of centralized and decentralized storage systems for a district heating network', *J. Energy Storage*, vol. 56, no. 106072, p. 106072, Dec. 2022.
- 23.J. Hennessy, H. Li, F. Wallin, and E. Thorin, 'Flexibility in thermal grids: a review of short-term storage in district heating distribution networks', *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 2430–2434, Feb. 2019.
- 24.D. Romanchenko, E. Nyholm, M. Odenberger, and F. Johnsson, 'Impacts of demand response from buildings and centralized thermal energy storage on district heating systems', *Sustain. Cities Soc.*, vol. 64, no. 102510, p. 102510, Jan. 2021.
- 25.A. Dahash, F. Ochs, and A. Tosatto, 'Techno-economic and exergy analysis of tank and pit thermal energy storage for renewables district heating systems', *Renew. Energy*, vol. 180, pp. 1358–1379, Dec. 2021.
- 26.R. Savolainen and R. Lahdelma, 'Optimization of renewable energy for buildings with energy storages and 15-minute power balance', *Energy (Oxf.)*, vol. 243, no. 123046, p. 123046, Mar. 2022.
- 27.R. Egging-Bratseth, H. Kauko, B. R. Knudsen, S. A. Bakke, A. Ettayebi, and I. R. Haufe, 'Seasonal storage and demand side management in district heating systems with demand uncertainty', *Appl. Energy*, vol. 285, no. 116392, p. 116392, Mar. 2021.
- 28.E. Borri, G. Zsembinski, and L. F. Cabeza, 'Recent developments of thermal energy storage applications in the built environment: A bibliometric analysis and systematic review', *Appl. Therm. Eng.*, vol. 189, no. 116666, p. 116666, May 2021.
- 29.E. Guelpa and V. Verda, 'Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review', *Appl. Energy*, vol. 252, no. 113474, p. 113474, Oct. 2019.
- 30.H. Li, J. Hou, Z. Tian, T. Hong, N. Nord, and D. Rohde, 'Optimize heat prosumers' economic performance under current heating price models by using water tank thermal energy storage', *Energy (Oxf.)*, vol. 239, no. 122103, p. 122103, Jan. 2022.
- 31.V. I. Deshko, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», D. S. Karpenko, and National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 'Analysis of conditions for the creation of the local thermal energy market in Ukraine', *Komunalne gospodarstvo mist*, vol. 7, no. 146, pp. 68–76, 2018.
- 32.D. Valeriy and K. Dmytro, 'Functional structure of the local thermal energy market in district heating', in *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2019.

Д.С. Карпенко¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-8022-9782

Т.О. Свтухова¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-4778-2479

О.В. Новосельцев¹, д-р техн. наук, ORCID 0000-0001-9272-6789

В.О. Ходаківський¹, аспірант, ORCID 0009-0007-3237-3476

¹Інститут загальної енергетики НАН України

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНКУРЕНТНОЇ СТРУКТУРИ РИНКУ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЧЕРЕЗ ЕНЕРГОНАКОПИЧУВАЧІ

У цій статті досліджується модернізація структурних схем у системах централізованого теплопостачання (СЦТ), що працюють в конкурентних умовах з використанням накопичувачів енергії. Визначаючи необхідність підвищення робочої гнучкості та надійності, особливо зі збільшенням частки відновлюваних джерел енергії, таких як вітер і сонце, в роботі досліджується роль накопичувачів енергії в оптимізації функціонування СЦТ. Основні завдання дослідження включають проведення огляду літератури для визначення ефективних технологій для інтеграції в СЦТ та визначення оновленої схеми структурної взаємодії, адаптованої до конкурентного середовища. Огляд літератури підкреслює потенціал різних рішень для зберігання теплової енергії, кожне з яких сприяє покращенню управління енергією, незважаючи на властиві економічні та технічні проблеми. Запропонована модернізація структурних схем переосмислює ролі багатьох учасників у СЦТ, включаючи виробників енергії, транспортні мережі та споживачів, а також сторони державного контролю та управління. Підсумовуючи, це дослідження підкреслює трансформаційний вплив інтеграції енергонакопичувачів у СЦТ, сприяння стійкій міській енергетичній інфраструктурі, яка відповідає глобальним цілям сталого розвитку.

Ключові слова: централізоване теплопостачання, ринок теплової енергії, зберігання енергії, відновлювані джерела енергії, стабільність мережі.

Надійшла: 19.02.2025

Received: 19.02.2025

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

УДК 629.33:502.3

DOI 10.20535/1813-5420.1.2025.324273

Д.О. Босий¹, д-р. техн. наук, професор, ORCID 0000-0003-1818-2490

Д.Р. Земський¹, д-р. філос. PhD, ORCID 0000-0003-4322-0727

К.М. Більцан¹, аспірант, ORCID 0009-0004-2499-4182

Т.І. Друбцецька¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-8580-9719

С.В. Боричева¹, ст. викладач, ORCID 0000-0002-2064-6621

¹Український державний університет науки і технологій

ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ У КРАЇНАХ ЄВРОПИ ЗА ІНТЕГРАЛЬНИМ ІНДЕКСОМ ВИКИДІВ

Метою статті є огляд розвитку електричного автомобільного транспорту та оцінка доцільності його використання у країнах Європи, виходячи з аналізу рівня викидів CO₂ за інтегральним показником.

Електричний автомобільний транспорт розвивається у трьох основних напрямках – використання акумуляторів, водневих паливних елементів та електрифікація автошляхів. Акумуляторні автомобілі мають широке застосування, але їхнє майбутнє може бути обмежене через проблеми з вартістю, зарядною інфраструктурою та сировиною. Водневі транспортні засоби пропонують швидку заправку, проте потребують значних інвестицій і високих стандартів безпеки. Електрифікація автошляхів включає як контактні, так і безконтактні системи передачі енергії. Контактні системи, зокрема, забезпечують високу потужність і низькі енергетичні втрати, що робить їх оптимальними для транспортних засобів з великими енергетичними потребами.

Екологічна ефективність електромобілів значною мірою залежить від джерела електроенергії. Країни з високою часткою альтернативних джерел електроенергії, такі як Норвегія і Франція, демонструють більшу екологічну ефективність застосування електроавтомобілів.

Особливу увагу варто приділити електрифікації автодоріг, що дозволяє зменшити тривалість автономного руху транспортного засобу від акумуляторної батареї та відповідно зменшити об'єм останніх, збільшуючи їх термін експлуатації. Це збільшить термін експлуатації накопичувачів та матиме позитивний вплив на довкілля через зменшення викидів забруднюючих речовин при виробництві та утилізації акумуляторів.

Ключові слова: електроавтомобілі, електротранспорт, EVEI, діоксид карбону, електрифікація автошляхів, екологічна ефективність.

Вступ. У світі спостерігається зростання продажів електромобілів [1-3], що зумовлено значно нижчими витратами на заряджання акумуляторів порівняно із заправкою традиційним паливом, меншими витратами на технічне обслуговування, а також маркетинговою привабливістю цих сучасних транспортних засобів. Так у 2023 році в усьому світі було зареєстровано майже 14 мільйонів нових електромобілів, що довело їх загальну кількість на у світі до 40 мільйонів [3]. У масовій свідомості електромобілі вважаються екологічно чистими транспортними засобами, оскільки під час руху не призводять забруднення довкілля, що асоціюється з традиційними автомобілями, такими речовинами, як оксиди азоту, вуглекислий газ та тверді частинки. Крім того, електромобілі мають іншу екологічну перевагу – вони значно тихіші, ніж автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння, що знижує шумове забруднення. Хоча з останнім важко сперечатися, перше твердження не є таким однозначним. Насправді, будь-який електротранспорт під час експлуатації спричиняє опосередковані викиди в атмосферу: підвищуючи попит на електроенергію, він перекладає відповідальність за забруднення на джерела її виробництва. А якщо додатково врахувати етапи доставки енергії до транспортного засобу, то екологічний слід електротранспорту виявляється далеко не нульовим [4, 5]. Зіставлення обсягів викидів парникових газів, що виникають під час виробництва, експлуатації та утилізації традиційних і електричних автомобілів, може показати подібні результати або навіть вказати на більшу шкоду від електромобілів. Якщо електроенергія виробляється виключно на вугільних електростанціях, то загальні викиди CO₂ за весь життєвий цикл автомобіля (включаючи виробництво, експлуатацію на дистанції 150 000 км та утилізацію) досягають 43 186 кг, що перевищує показник бензинового автомобіля в аналогічних умовах (37 322 кг) [6]. Однак, при використанні виключно

відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові електростанції, викиди CO₂ від електромобіля суттєво знижуються – до 16 106 кг за весь період його експлуатації.

Тому структура виробництва електроенергії має суттєвий вплив на екологічну доцільність використання електроавтомобілів, яку кількісно можна оцінити застосовуючи відповідний показник – EVEI (Electric Vehicle Emissions Index). Ця метрика, запропонована в роботі [7], враховує викиди від традиційного транспортного засобу та викиди від виробництва та споживання електроенергії, включаючи генерацію, передачу енергії електричними мережами та її перетворення у внутрішніх системах електроавтомобіля. Індекс надає можливість враховувати різницю у викидах на регіональному рівні, що дозволяє використовувати його для формування політики та стимулів до розвитку альтернативних джерел електроенергії та електричного транспорту.

Метою статті є огляд розвитку електричного автомобільного транспорту та оцінка доцільності його використання у країнах Європи, виходячи з аналізу рівня викидів CO₂ за інтегральним показником.

Для досягнення поставленої мети передбачається виконання наступних задач дослідження:

1. Огляд сучасного стану розвитку електричного автотранспорту
2. Аналіз технологій електрифікації автомобільного транспорту
3. Дослідження впливу акумуляторних електромобілів на викиди CO₂

1. Сучасний стан розвитку електричного автотранспорту

За 2023 рік у світі парк електроавтомобілів зріс до 40 мільйонів, продажі зросли на 35 % порівняно з 2022 роком, і електромобілі склали 18 % від усіх проданих автомобілів. Основними ринками, які разом забезпечили 95% глобальних продажів, були Китай, Європа та США [1-3]. Динаміка кількості електроавтомобілів за 2018-2023 рр. у світі та Європі показана на рис. 1 та 2.

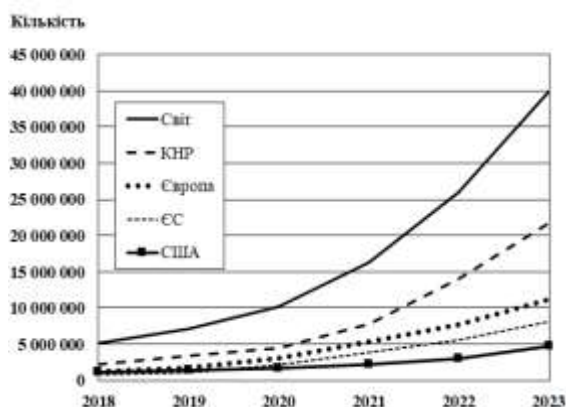


Рисунок 1 – Кількість електромобілів у світі та світові держави-лідери, 2018–2023 рр.

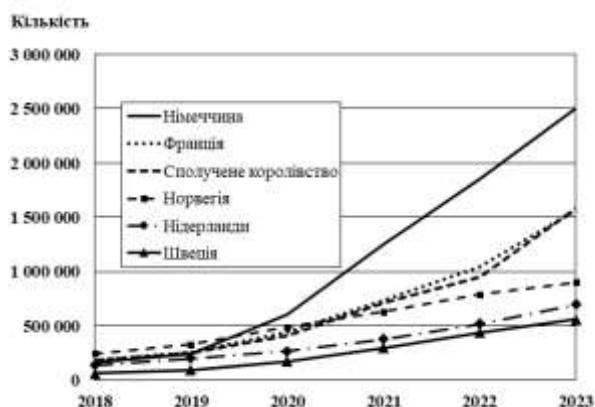


Рисунок 2 – Європейські держави-лідери за кількістю електроавтомобілів, 2018–2023 рр.

У 2023 році продажі електромобілів у Європі зросли майже на 20 %. У Німеччині вперше за рік зареєстровано 700 тисяч нових електроавтомобілів. У Швеції електромобілі склали 60 % від усіх проданих авто, а в Норвегії – 93 %. На рис. 3 та 4 показано статистику продажів електротранспорту за минулий (2023) рік, що демонструє наскільки активно ці країни переходять на нові види транспорту.

Станом на 2024 рік загальна кількість легкових транспортних засобів у Євросоюзі досягла близько 289 млн. Серед них 1 672 998 електромобілів, із яких 66,4 % працюють на акумуляторних батареях, 33,3 % – це гібриди з двигунами внутрішнього згоряння та 0,3% – автомобілі з водневими паливними елементами (ВПЕ).

Електромобільний транспорт стрімко поширюється, охоплюючи не лише легкові автомобілі, а й громадський та вантажний транспорт. У 2023 році у Бельгії, Норвегії та Швейцарії продажі електроавтобусів вже перевищили продажі звичайних. Загалом у Європейському Союзі акумуляторні автобуси склали 43 % від усіх міських автобусів, придбаних у цьому ж році.

Світові продажі електричних вантажівок також демонструють значне зростання – у 2023 році вони збільшилися на 35% порівняно з 2022 роком. У Європі тенденція не менш динамічна – у 2021 році було зареєстровано 1 700 електричних вантажівок, у 2022 – 3 700, а вже у 2023 році ця цифра зросла до 10 800 одиниць.

Продажі електричних вантажівок зростають, значною мірою завдяки урядовій підтримці. Наприклад, стандарти Європейського Союзу вимагають скоротити викиди CO₂ на 90 % до 2040 року. Водночас уряд Великої Британії інвестує 250 млн доларів США у програму Zero Emission HGV and Infrastructure Programme [8], спрямовану на проведення реальних випробувань екологічно чистих вантажівок. У рамках цієї ініціативи планується задіяти 370 вантажівок і збудувати майже 60 сучасних зарядних та заправних станцій.



Рисунок 3 – Кількість проданих нових електричних автомобілів, 2023 р.



Рисунок 4 – Частка нових електричних автомобілів з проданих автотранспортних засобів у 2023 р.

У 2024 році загальна кількість зарядних пристроїв для акумуляторних автомобілів у Європі становить близько 800 тисяч, для автомобілів з ВПЕ – 269 одиниць.

Таким чином, подальший розвиток ринку електричного автотранспорту після його насичення персональними електромобілями та електробусами визначатиметься попитом комерційних перевізників на електричні вантажівки, які здатні конкурувати із залізницями при перевезенні комерційних вантажів.

2. Аналіз технологій електрифікації автомобільного транспорту

Ідея застосування безрейкового електротранспорту не є новою і почала реалізовуватись наприкінці XIX століття. На початку XX століття електромобілі, які працювали на свинцево-кислотних акумуляторних батареях, конкурували з автомобілями з двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ). Однак, з розвитком виробничих процесів та впровадженням масового виробництва дешевих автомобілів з двигунами внутрішнього згорання, електротранспорт поступово втратив свою конкурентну перевагу. Крім того, винайдення електричного запалювання сприяло подальшому уповільненню розвитку акумуляторних автомобілів до кінця 1980-х років XX століття.

Зростання екологічних проблем та інтенсивний розвиток альтернативних джерел енергії спонукали компанії до повторного інвестування у розвиток електромобілів. У 1996 році General Motors випустила серійний електромобіль GM EV1 на свинцево-кислотних акумуляторах, який став важливим кроком у відродженні інтересу до електротранспорту. Вже наступного року Toyota представила перший гібридний автомобіль Toyota Prius, обладнаний бензиновим двигуном та нікель-металогідридним (NiMH) акумулятором. Ці кроки показали, що електродвигуни можуть ефективно конкурувати з ДВЗ, подолавши обмеження, пов'язані з низькою ємністю накопичувачів електроенергії [9].

Крім акумуляторних систем, для електромобілів активно розглядаються водневі паливні елементи (ВПЕ) як альтернативне джерело енергії. Першим автомобілем на водневих паливних елементах став Chevrolet Electrovan, виготовлений General Motors у 1966 році. Однак, подальші розробки в цій галузі були економічно недоцільними на той час. Після тривалого періоду затишшя, у 1996 році Toyota Motor Corporation продемонструвала FCHV-1 – перший автомобіль компанії на паливних елементах.

Також відома інша теологія, історія якої розпочалася 1882 року, коли В. Сіменс випробував карету на електричній тязі, яка отримувала електроенергію від гнучкого кабелю через приєднаний до контактного проводу візок – trolley. Від останнього походить назва тролейбусів – поширеного виду громадського електротранспорту, який характеризується штанговим струмоприймачем, що забезпечує маневреність на автомобільних дорогах. У XX столітті експериментували з тролейбусами – вантажівками з тролейбусним струмоприймачем. Основною перевагою тролейбусів є здатність електродвигунів до реалізації більшої швидкості на підйомі. Сучасні тролейбуси, наприклад кар'єрний самоскид від Hitachi [11], обладнані пантографами. Це обумовлено тим, що штанги можуть зірватися з контактного проводу, а також відсутністю необхідності в високій маневреності транспортних засобів у кар'єрних умовах.

Таким чином, необхідно розглянути три базові напрямки розвитку автомобільного транспорту:

1. Використання накопичувачів електроенергії;
2. Використання водневих паливних елементів;
3. Електрифікація автошляхів.

Автотранспортні засоби з накопичувачами. Для цього виду транспорту енергія, яка накопичена в акумуляторній батареї, передається на електропривод електромобіля, що складається з інвертора та електродвигуна. Загальна ефективність передачі енергії від батареї до коліс сягає близько 80 %. Зарядка батареї здійснюється від електромережі. Серед електроавтомобілів з накопичувачами виділяють кілька типів: HEV (Hybrid Electric Vehicle) – це гібридні електромобілі, які поєднують двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) та електродвигун, причому батарея заряджається під час роботи ДВЗ або рекуперації енергії; PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) – це гібриди з більшою батареєю, яка дозволяє заряджати автомобіль від зовнішніх джерел електроенергії; REEV (Range-Extended Electric Vehicle) – це електромобілі із подовжувачем пробігу, де ДВЗ використовується лише для зарядки батареї, а рух здійснюється виключно за рахунок електродвигуна; BEV (Battery Electric Vehicle) – це повністю електричні автомобілі, що працюють лише на батареї, яка заряджається від зовнішніх джерел, без наявності ДВЗ, а пробіг залежить від ємності акумулятора.

Аналіз джерел [9-13] свідчить, що використання акумуляторних автомобілів супроводжується рядом викликів. Зокрема, необхідно масштабувати виробництво акумуляторів, розширювати інфраструктуру зарядних станцій і створювати відповідні логістичні центри. Попри прогрес у зниженні вартості та покращенні характеристик акумуляторів, дефіцит сировини може призвести до дисбалансу між попитом і пропозицією, збільшення вартості накопичувачів та затримок у їх виробництві.

Сучасні електровантажівки мають можливість проїхати від 300 до 500 км на одному заряді, залежно від виробника, стилю водіння, умов експлуатації та навколишнього середовища. У той же час вантажівки з дизельними двигунами можуть подолати до 2000 км на одному баку пального. Хоча ця відстань зазвичай не долається за один день, вона свідчить про можливість багатозмінного використання таких транспортних засобів.

Однією з конкурентних переваг транспортних засобів з дизельними двигунами є швидкість дозаправки, яка значно коротша, ніж процес зарядки акумуляторів.

Загалом, накопичувачі найкраще підходять для коротких, запланованих перевезень, де можливий тривалий час зарядки. Для довготривалих маршрутів потрібна інфраструктура зарядних станцій із можливістю попереднього бронювання, щоб забезпечити високу доступність та економічну ефективність.

Автотранспортні засоби з ВПЕ. Водневий паливний елемент (ВПЕ) – це пристрій, який перетворює хімічну енергію водню в електричну енергію за допомогою електрохімічної реакції між воднем і киснем. В результаті цієї реакції утворюються вода та енергія, яка запасається у акумуляторній батареї автомобіля. Рекуперація енергії безпосередньо в паливний елемент неможлива. Паливний елемент підключається до акумулятора через DC-DC перетворювач. Ефективність такої системи становить приблизно 45 % [9].

Використання водню як джерела енергії для транспортних засобів, особливо для здійснення далеких перевезень, є інноваційною технологією з великим потенціалом, якщо виробництво водню буде здійснюватися з використанням відновлюваних джерел електроенергії. Водночас у наукових публікаціях, присвячених цій технології [9, 14-16], акцентується увага на високих витратах, пов'язаних із використанням водневих транспортних засобів. Так вважається, що Європа не матиме достатньо відновлюваної електроенергії для виробництва всього необхідного водню, тому впровадження транспортних засобів з ВПЕ передбачатиме його імпорт. Це вимагає великомасштабного виробництва водню за кордоном та засобів для його транспортування.

Серед ключових переваг водневих вантажівок – швидкий процес заправки та висока енергетична щільність водню. Проте водень займає більше простору, що скорочує доступний об'єм для вантажу.

Крім того, водень – вибухонебезпечний, що вимагає високих стандартів безпеки.

Дальність руху вантажівок на паливних елементах без додаткової заправки варіюється залежно від моделі та виробника. Наприклад, у [17] вказують на дистанцію близько 1000 км без дозаправки, а у [18] орієнтують на 500 км.

Електрифікація автошляхів. Ще одним напрямком розвитку автомобільного транспорту є використання різних технологій передачі електроенергії рухомим транспортним засобам. Аналіз аналітичних звітів та наукових публікацій [19-26] дозволяє виділити ключові характеристики цього напрямку. Насамперед, способи передачі електроенергії до транспортного засобу поділяються на контактні та безконтактні.

Контактні системи передбачають використання повітряних ліній (контактною мережі) або рейок, розташованих у дорожньому покритті чи над ним. Наприклад, показане на рис. 5, рішення Siemens із контактними проводами використовує пантограф, що забезпечує підключення до повітряних ліній уздовж автомобільної дороги.



Рисунок 5 – Струмopриймач вантажного автомобіля (сідлового тягача) з контактної мережею

Значний досвід впровадження та використання у залізничному транспорті та міських пасажирських перевезеннях контактних мереж надає їм чимало переваг. Він дозволяє врахувати всі потенційні технічні й експлуатаційні виклики, зокрема аспекти безпеки та надійності системи.

Крім того, завдяки наявності кваліфікованих фахівців, які пройшли спеціальну підготовку, можливе швидке розгортання таких систем на автомобільних магістралях. Цей професійний ресурс дозволяє забезпечити якісний монтаж та подальше обслуговування повітряних контактних мереж, що робить їх привабливими для інтеграції у дорожню інфраструктуру.

Варіанти зі струмопровідними рейками, завдяки меншій відстані між транспортним засобом і точкою контакту, забезпечують ширшу сферу застосування та можуть використовуватись для живлення різних типів транспорту. Електричний зв'язок із рейкою встановлюється за допомогою висувного струмоприймача, розташованого під транспортним засобом.

Існує кілька рішень, що відрізняються конструктивними особливостями. Наприклад, компанія Evias реалізувала систему, у якій дві рейки розташовані в пазах на дорожньому покритті. Вони розділені на сегменти по 50 метрів і активуються лише тоді, коли над ними проїжджає транспортний засіб. Рішення від Elopoad передбачає використання рейки, яка складається з коротких заземлених сегментів, встановлених уздовж однієї лінії. Ці сегменти послідовно активуються тільки під час руху транспортного засобу над ними. Компанія Honda розробила свою систему, де рейка не інтегрована в дорогу, а прикріплена до дорожнього бар'єру. У цьому рішенні струмоприймач висувається збоку автомобіля та підключається до позитивного й негативного полюсів рейки. Максимальна допустима відстань між автомобілем і рейкою становить 1,3 м.

Розташування струмопровідних компонентів контактної системи поблизу поверхні дороги потребує особливої уваги до безпеки. Це збільшує ризик їхнього пошкодження, що може призвести до серйозних наслідків. Зокрема, зростає ймовірність зіткнення транспортних засобів із струмопровідними елементами, а також впливу несприятливих зовнішніх факторів, таких як погодні умови чи механічні ушкодження від дорожнього руху.

У безконтактних системах енергія передається від дороги до автомобіля без використання проводів засобами індуктивного зв'язку. Це здійснюється за допомогою двох наборів котушок – одна у дорозі, інша в автомобілі. Відповідно, безконтактні системи мають переваги: відсутність струмоприймача поза кузовом транспортного засобу, що позитивно впливає на естетичний вигляд автомобіля та знижує ймовірність його механічного пошкодження, а також, закриваючи елементи системи від прямого доступу, знижує ризик ураження електричним струмом, проте ускладнює її обслуговування. Недоліком безконтактних систем є втрати енергії у її елементах та дорожньому покритті. Також предметом дослідження є електромагнітна сумісність системи із суміжними пристроями та самими транспортними засобами.

Контактні системи передають набагато більше потужності. Наприклад, Siemens та Evias – до 200 кВт, Honda – до 450 кВт. Натомість, безконтактна система від Electreon передає лише 20 кВт. Проблемою, з якою стикаються контактні системи, є зношення пристроїв у місці контакту, що призводить до необхідності регулярного контролю стану проводів або рейок. Технологія з рейкою вимагає постійного контролю та обслуговування з'єднувальних швів між рейкою та поверхнею дороги, з метою запобігання проникнення води у покриття дороги. Іншою проблемою є старіння та забруднення рейок. Це особливо актуально для системи від Evias, де рейки розташовані нижче поверхні дороги. Загалом, для рейкових систем складніше вирішується проблема забезпечення захисту від ураження електричним струмом. У той

же час рішення з контактною мережею впливає на дорожню структуру лише через встановлення опор повітряної лінії біля дорожнього покриття, що також може вплинути на стійкість дорожньої основи та спричинити осідання ґрунту, якщо опори розташовані занадто близько до дороги.

Також, локалізація транспортних засобів в одній частині дорожнього полотна призводить до нерівномірного розподілу навантаження. Унаслідок цього на ділянках дороги, де колеса автомобілів контактують з поверхнею, поступово утворюються поглиблення. Ця проблема актуальна для всіх систем зарядки автомобілів під час руху, оскільки такі технології передбачають, що транспортні засоби повинні рухатися у визначених смугах, де вбудовані елементи зарядної інфраструктури. Як результат, постійне навантаження на одні й ті самі ділянки дороги може значно пришвидшити її зношення.

3. Вплив акумуляторних електромобілів на викиди CO₂

На сьогодні більшість електромобілів, поширених у країнах Європи, належать до акумуляторного типу. Тому проаналізуємо викиди CO₂ спричинені цим видом електротранспорту під час руху в залежності від структури виробництва електроенергії.

Оцінку виконаємо для умовного акумуляторного електромобіля, без прив'язки до конкретної моделі транспортного засобу. Результати варіюються залежно від регіональних особливостей генерації електроенергії та ефективності її передачі через енергомережі кожної окремої країни.

Electric Vehicle Emissions Index (далі індекс викидів або EVEI) розраховується як відношення загальних викидів електромобіля до викидів автомобіля з двигуном внутрішнього згорання при проходженні однакової відстані d

$$EVEI = \frac{\varepsilon_{EV}}{\varepsilon_{ICEV}}, \quad (1)$$

де ε_{EV} – емісія від електроавтомобіля,

$$\varepsilon_{EV} = \frac{d\gamma_E\rho_{EV}}{\eta_N\eta_{WW}},$$

ε_{ICEV} – емісія від традиційного автомобіля,

$$\varepsilon_{ICEV} = d\gamma_G k\rho_{ICEV}.$$

До виразу (1), за яким визначають індекс викидів, входять наступні складові:

γ_E – питомі викиди парникового газу на одиницю електроенергії;

ρ_{EV} – питома витрата електроенергії електроавтомобілем під час руху;

η_N – ефективність електромережі;

η_{WW} – ефективність перетворення електроенергії у електроавтомобілі;

γ_G – питомі викиди парникового газу від спалювання одиниці палива;

ρ_{ICEV} – питома витрата палива на одиницю відстані;

k – фактор викидів у виробничому ланцюгу, що враховує додаткові викиди, які утворюються під час виробництва, транспортування, зберігання та переробки палива.

Для розрахунку значення параметрів взяті з наступних джерел: γ_E – з [27], $\rho_{EV} = 0,15 \dots 0,25$ кВт·год/км [28], η_N – з [29], $\eta_{WW} = 0,8$ з [9].

Добуток $\gamma_G \cdot \rho_{ICEV} = 122,7$ г/км для бензинового ДВЗ [30], при цьому $k = 1,25$ [7]. Тоді викиди CO₂ від традиційного автомобіля з урахуванням виробничого ланцюга становлять 153,4 г/км.

Результат розрахунку індексу викидів представлений в табл. 1, а кластеризація країн за рівнем викидів EVEI (max) для верхньої межі ρ_{EV} – на рис. 6.

Використавши [6], де вказані викиди CO₂ від електроавтомобіля та автомобіля з ДВЗ упродовж всього циклу життя, встановимо, що викид CO₂ від електроавтомобіля без врахування перевізної роботи становить 15 500 кг за 10 років. Вважаючи, що за 10 років автомобіль проїде 150 тис. км та результати розрахунку емісії CO₂ з табл. 1, отримаємо сукупні викиди парникового газу за аналогічний період. Після зіставлення останніх з викидами автомобілів з ДВЗ за 10 років, можна встановити, що вже при значенні EVEI 0,96 і вище загальні викиди від електроавтомобіля перевищують викиди від традиційного автомобіля.

Тому для країн з переважною генерацією електроенергії від вугільних та газових електростанцій, таких як Польща, Кіпр, Мальта та Чехія, використання акумуляторних автомобілів призведе до збільшення викидів парникового газу в атмосферу.

Норвегія та Франція, демонструють високий рівень екологічної відповідальності завдяки структурі своїх енергетичних систем. Норвегія майже повністю покладається на гідроенергетику, що забезпечує чисту та відновлювану енергію для внутрішнього споживання. У Франції основну частку електроенергії виробляють атомні станції, які мають низький рівень викидів CO₂. Розвиток електротранспорту у цих країнах матиме значний позитивний екологічний ефект.

Країни з помірно низькими показниками EVEI, зокрема, Данія, Португалія та Люксембург, мають структуру енергетики, з меншою часткою відновлювальної та атомної енергетики. Водночас вони продовжують використовувати викопне паливо, що впливає на загальний рівень викидів.

Серед країн із середніми показниками EVEI можна виділити Україну, Італію, Німеччину. Ці країни мають змішану енергетичну структуру, яка все ще значною мірою залежить від вугілля та газу, та обумовлює середній рівень викидів CO₂. Але розвиток електротранспорту також дає зниження викидів вуглекислого газу.

Таблиця 1. Розрахунок індексу викидів CO₂

Держава	γ_E , г/(кВт·год)	η_N	ε_{EV} (min), г/км	ε_{EV} (max), г/км	EVEI (min), г/км	EVEI (max), г/км
Норвегія	30	0,94	6,01	10,01	0,04	0,07
Швеція	41	0,95	8,01	13,36	0,05	0,09
Франція	56	0,94	11,22	18,7	0,07	0,12
Фінляндія	79	0,96	15,47	25,79	0,1	0,17
Люксембург	105	0,94	21,06	35,11	0,14	0,23
Австрія	111	0,95	21,95	36,58	0,14	0,24
Словаччина	117	0,98	22,45	37,41	0,15	0,24
Латвія	123	0,91	25,4	42,33	0,17	0,28
Бельгія	138	0,95	27,38	45,63	0,18	0,3
Данія	152	0,94	30,29	50,49	0,2	0,33
Литва	160	0,78	38,47	64,11	0,25	0,42
Португалія	166	0,9	34,5	57,5	0,22	0,37
Іспанія	174	0,9	36,1	60,17	0,24	0,39
Угорщина	204	0,88	43,68	72,8	0,28	0,47
Хорватія	205	0,87	44,24	73,73	0,29	0,48
Словенія	231	0,95	45,54	75,9	0,3	0,49
Сполучене королівство	238	0,92	48,61	81,01	0,32	0,53
Румунія	241	0,89	50,62	84,36	0,33	0,55
Україна	260	0,89	54,64	91,07	0,36	0,59
Нідерланди	268	0,95	52,69	87,82	0,34	0,57
Ірландія	291	0,92	59,22	98,69	0,39	0,64
Європа	319	0,94	63,78	106,3	0,42	0,69
Італія	331	0,93	66,67	111,12	0,43	0,72
Греція	337	0,92	68,78	114,63	0,45	0,75
Німеччина	381	0,96	74,31	123,86	0,48	0,81
Естонія	417	0,93	83,79	139,66	0,55	0,91
Чехія	450	0,95	88,32	147,19	0,58	0,96
Мальта	459	0,95	90,31	150,52	0,59	0,98
Кіпр	534	0,96	104,33	173,89	0,68	1,13
Молдова	643	0,78	154,68	257,80	1,01	1,68
Польща	662	0,94	132,69	221,15	0,87	1,44

Висновки. Аналіз статичної інформації та огляд аналітичних звітів вказує на подальший розвиток та інтерес до електроавтомобілів у тривалій перспективі. У Європі отримали поширення акумуляторні електроавтомобілі, що зумовлено простішим доступом до джерел енергії порівняно з технологіями на основі водневих паливних елементів.

Попри перспективність, транспорт із водневими паливними елементами наразі має обмежене застосування. Основними причинами цього є висока вартість виробництва водню, недостатньо розвинена інфраструктура для заправки та складнощі, пов'язані зі зберіганням водню.

Якщо оцінювати технологію електрифікації шляхів, то вона потребує значних інвестицій в інфраструктуру та обмежує застосування транспортних засобів лише маршрутним сполученням. Однак, така технологія має суттєві екологічні переваги, а саме, дозволяє зменшити екологічний слід електротранспорту завдяки відсутності акумуляторів, а відповідно і викидів від їх виробництва та утилізації.

Поєднання електрифікації автошляхів з технологією акумуляторних автомобілів дозволяє використовувати меншу батарею та економити її ресурс на маршруті, коли транспортний засіб приєднаний до мережі, що також дозволяє зменшити шкідливий вплив на довкілля.

Важливе значення у екологічному аспекті застосування електротранспорту має структура виробництва електроенергії. Найкращі перспективи у цьому напрямку демонструють країни Скандинавського півострова та Франція, де індекс EVEI не перевищує 0,2. За розрахунками, інтегральне

значення EVEI для Європи становить 0,69, що підтверджує доцільність використання електричного автотранспорту.

Для України впровадження технологій електрифікації автомобільних шляхів для вантажних та пасажирських перевезень є також перспективним. Такий підхід може забезпечити декілька важливих переваг, а саме:

1. Електрифікація транспортної інфраструктури сприятиме суттєвому зниженню викидів парникових газів, що позитивно вплине на стан навколишнього середовища.

2. Впровадження цих технологій сприятиме підвищенню енергетичної незалежності країни. Використання електроенергії, що виробляється з відновлювальних джерел, таких як вітрові, сонячні та гідроелектростанції, дозволить знизити залежність від імпорту нафти та газу.

3. Розширення використання електрифікованих шляхів може стати каталізатором для розвитку транспортної інфраструктури та інноваційних рішень у галузі. Такі проекти здатні залучити інвестиції й створити нові робочі місця.

Загалом, інтеграція технологій електричного автотранспорту відповідає глобальним тенденціям декарбонізації транспортної галузі, що також відкриває можливості для регіонального та міжнародного співробітництва у сфері зеленої енергетики та транспорту.



Рисунок 6 – Інтегральний індекс викидів EVEI для країн Європи

D. Bosyi¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-1818-2490

D. Zemskyi¹, PhD, ORCID 0000-0003-4322-0727

K. Biltsan¹, PhD student, ORCID 0009-0004-2499-4182

T. Drubetska¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-8580-9719

S. Borycheva¹, Senior Lecturer, ORCID 0000-0002-2064-6621

¹Ukrainian State University of Science and Technologies

FEASIBILITY AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF ELECTRIC ROAD TRANSPORT IN EUROPEAN COUNTRIES BASED ON THE INTEGRAL EMISSIONS INDEX

The aim of this article is to review the development of electric road transport and assess its feasibility in European countries based on an analysis of CO₂ emissions using an integral index.

Electric road transport is evolving in three main directions: battery-powered vehicles, hydrogen fuel cell vehicles, and road electrification. Battery electric vehicles are widely used, but their future may be constrained by issues related to cost, charging infrastructure, and raw material availability. Hydrogen-powered vehicles offer fast refueling; however, they require substantial investments and strict safety standards. Road electrification includes both contact and wireless energy transfer systems. Contact-based systems, in particular, provide high power and low energy losses, making them optimal for vehicles with significant energy demands.

The environmental efficiency of electric vehicles largely depends on the source of electricity. Countries with a high share of renewable energy, such as Norway and France, demonstrate greater environmental efficiency in electric vehicle adoption.

Special attention should be given to road electrification, which reduces the duration of battery-powered autonomous driving and allows for smaller battery sizes, thereby extending their lifespan. This approach not only increases battery longevity but also has a positive environmental impact by reducing emissions associated with battery production and disposal.

Keywords: *electric vehicles, electric transport, EVEI, carbon dioxide, electrification of roads, environmental efficiency.*

References

1. H. Ritchie and M. Roser, "Tracking global data on electric vehicles," Our World in Data, Mar. 12, 2024. <https://ourworldindata.org/electric-car-sales>
2. "European Union (EU27) | European Alternative Fuels Observatory." <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27>
3. "Trends in electric cars – Global EV Outlook 2024 – Analysis - IEA," IEA. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-cars>
4. M. Guzek, J. Jackowski, R. S. Jurecki, E. M. Szumska, P. Zdanowicz, and M. Żmuda, "Electric Vehicles—An Overview of Current Issues—Part 1—Environmental impact, source of energy, recycling, and second life of battery," *Energies*, vol. 17, no. 1, p. 249, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17010249.
5. M. Guzek, J. Jackowski, R. Jurecki, E. Szumska, P. Zdanowicz, and M. Żmuda, "Electric Vehicles—An Overview of Current Issues—Part 2—Infrastructure and Road Safety," *Energies*, vol. 17, no. 2, p. 495, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17020495.
6. M. Neugebauer, A. Żebrowski, and O. Esmer, "Cumulative emissions of CO₂ for electric and combustion cars: a case study on specific models," *Energies*, vol. 15, no. 7, p. 2703, Apr. 2022, doi: 10.3390/en15072703.
7. A. Manjunath and G. Gross, "Towards a meaningful metric for the quantification of GHG emissions of electric vehicles (EVs)," *Energy Policy*, vol. 102, pp. 423–429, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2016.12.003.
8. Department for Transport, "Government invests £200 million to drive innovation and get more zero emission trucks on our roads," GOV.UK, Oct. 18, 2023. [Online]. Available: [https://www.gov.uk/government/news/government-invests-200-million-to-drive-innovation-and-get-more-zero-emission-trucks-on-our-roads#:~:text=With%20heavy%20goods%20vehicles%20\(%20HGVs,on%20the%20path%20towards%20net](https://www.gov.uk/government/news/government-invests-200-million-to-drive-innovation-and-get-more-zero-emission-trucks-on-our-roads#:~:text=With%20heavy%20goods%20vehicles%20(%20HGVs,on%20the%20path%20towards%20net)
9. J. G. Hayes and G. A. Goodarzi, *Electric Powertrain: Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles*. John Wiley & Sons, 2017.
10. "Joint Development of an Engineless, Full Battery Rigid Dump Truck with ABB," Hitachi Construction Machinery, Jun. 22, 2021. [Online]. Available: <https://www.hitachicm.com/global/en/news/press-releases/2021/21-06-23>
11. W. Shoman, S. Yeh, F. Sprei, P. Plötz, and D. Speth, "Battery electric long-haul trucks in Europe: Public charging, energy, and power requirements," *Transportation Research Part D Transport and Environment*, vol. 121, p. 103825, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.trd.2023.103825.

12. Siemens, "What's the best strategy for climate-friendly road freight transportation?," 2021. Accessed: Dec. 13, 2024. [Online]. Available: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:760942b4-5661-43c1-b9f8-079741d12e6e/smo-Factsheet-Road-Freight-Transport-eHighway.pdf>
13. J. Karlsson and A. Grauers, "Agent-Based investigation of competing charge point operators for battery electric trucks," *Energies*, vol. 17, no. 12, p. 2901, Jun. 2024, doi: 10.3390/en17122901.
14. C. Cunanan, M.-K. Tran, Y. Lee, S. Kwok, V. Leung, and M. Fowler, "A review of Heavy-Duty vehicle powertrain technologies: diesel engine vehicles, battery electric vehicles, and hydrogen fuel cell electric vehicles," *Clean Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 474–489, Jun. 2021, doi: 10.3390/cleantechnol3020028.
15. M. De Las Nieves Camacho, D. Jurburg, and M. Tanco, "Hydrogen fuel cell heavy-duty trucks: Review of main research topics," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 68, pp. 29505–29525, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.271.
16. Z. Mu, F. Zhao, F. Bai, Z. Liu, and H. Hao, "Evaluating Fuel Cell vs. Battery Electric Trucks: Economic Perspectives in Alignment with China's Carbon Neutrality Target," *Sustainability*, vol. 16, no. 6, p. 2427, Mar. 2024, doi: 10.3390/su16062427.
17. V. Trucks, "Fuel cell trucks – when and why do we need them?," www.volvotrucks.com, May 05, 2023. <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/stories/2022/nov/when-and-why-fuel-cell-truck.html>
18. N. Motor, "TRE FCEV - Nikola Hydrogen-Electric Semi-Truck," Nikola Corporation, Nov. 19, 2024. <https://www.nikolamotor.com/tre-fcev>
19. Y. Pei, F. Chen, T. Ma, and G. Gu, "A comparative review study on the electrified road structures: Performances, sustainability, and prospects," *Structures*, vol. 62, p. 106185, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.istruc.2024.106185.
20. PIARC, "Electric Road Systems : A route to net zero," 2023R30EN-Technical Report, 2023. [Online]. Available: <https://www.piarc.org/en/order-library/42690-en-Electric%20Road%20Systems%20-%20A%20Route%20toNet%20Zero%20-%20Technical%20Report>
21. G. Domingues-Olavarria, F. Márquez-Fernández, P. Fyhr, A. Reinap, and M. Alaküla, "Electric Roads: Analyzing the societal cost of electrifying all Danish road transport," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 9, no. 1, p. 9, Jun. 2018, doi: 10.3390/wevj9010009.
22. G. Asplund and B. Rehman, "Conductive feeding of electric vehicles from the road while driving," 2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nuremberg, Germany, 2014, pp. 1-9, doi: 10.1109/EDPC.2014.6984418.
23. F. Chen, T. Ma, J. Zhu, and Y. Pei, "Comparative structural performance assessment of electrified road systems," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 24, no. 2, Jul. 2022, doi: 10.1080/10298436.2022.2098293.
24. S. Varikkottil and F. D. JL, "Compact pulse position control-based inverter for high efficiency inductive power transfer to electric vehicle," *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 1, pp. 86–95, Oct. 2019, doi: 10.1049/iet-pel.2019.0720.
25. K. Y. Lee, F. Bühs, D. Göhlich, and S. Park, "Towards reliable design and operation of electric road systems for Heavy-Duty vehicles under realistic traffic scenarios," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 10, pp. 10963–10976, Jun. 2023, doi: 10.1109/tits.2023.3280948.
26. M. Taljegard, L. Thorson, M. Odenberger, and F. Johnsson, "Large-scale implementation of electric road systems: Associated costs and the impact on CO2 emissions," *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 14, no. 8, pp. 606–619, Apr. 2019, doi: 10.1080/15568318.2019.1595227.
27. H. Ritchie, P. Rosado, and M. Roser, "Electricity mix," *Our World in Data*, Jan. 04, 2024. <https://ourworldindata.org/electricity-mix>
28. M. Weiss, T. Winbush, A. Newman, and E. Helmers, "Energy consumption of electric vehicles in Europe," *Sustainability*, vol. 16, no. 17, p. 7529, Aug. 2024, doi: 10.3390/su16177529.
29. "World Bank Open Data," *World Bank Open Data*. https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?end=2023&most_recent_value_desc=false&start=2000&view=chart&year=2014
30. G. Fontaras, N.-G. Zacharof, and B. Ciuffo, "Fuel consumption and CO 2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 60, pp. 97–131, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.peccs.2016.12.004.

Надійшла: 19.02.2025
Received: 19.02.2025

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ НЕЗАКОННОГО ОБІГУ РАДІОАКТИВНИХ МАТЕРІАЛІВ

Сучасні проблеми незаконного обігу радіоактивних матеріалів становлять серйозну загрозу для глобальної безпеки, екології та здоров'я людей.

Провівши аналіз ключових аспектів цього явища, можна визначити причини його виникнення, зокрема недостатній контроль за радіоактивними матеріалами, слабкість регуляторних механізмів у низці країн, а також зростання терористичних та кримінальних загроз. У статті розглядаються наслідки незаконного обігу радіоактивних матеріалів для суспільства, такі як ризики радіаційного забруднення, підвищення рівня терористичної активності та економічні втрати.

Особлива увага приділяється аналізу міжнародних зусиль щодо протидії незаконному обігу радіоактивних матеріалів, включаючи діяльність таких організацій, як Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ) та Глобальна ініціатива з боротьби з актами ядерного тероризму. Висвітлено роль сучасних технологій моніторингу, інтегрованих систем спостереження та автоматизації процесів контролю.

Пропонуються шляхи підвищення ефективності протидії, серед яких удосконалення міжнародного законодавства, створення глобальної бази даних радіоактивних матеріалів, підвищення рівня професійної підготовки персоналу, відповідального за контроль, а також посилення інформаційної взаємодії між державами. Стаття є внеском у наукове обговорення проблеми та пропонує конкретні практичні заходи, спрямовані на зменшення ризиків, пов'язаних з незаконним обігом радіоактивних матеріалів.

Ключові слова: *радіоактивні матеріали поза регулюючим контролем, незаконний обіг радіоактивних матеріалів, неправомірне використання радіоактивних матеріалів, ядерний тероризм, «брудна бомба», екологічна катастрофа, радіоактивне забруднення навколишнього середовища.*

Вступ.

Сучасний світ перебуває у стані глобальних викликів, одним із яких є проблема незаконного обігу радіоактивних матеріалів. Ці матеріали, використання яких раніше було обмежене науковими дослідженнями, промисловістю, медициною та атомною енергетикою, тепер стали об'єктом інтересу для злочинних угруповань і терористичних організацій [1, 2]. Наслідки неправомірного використання радіоактивних матеріалів можуть бути катастрофічними: від локального радіаційного забруднення до створення радіологічних "брудних бомб", здатних завдати шкоди населенню, екології та економіці на глобальному рівні [3, 4].

Особливу актуальність ця проблема має для України, яка є транзитною країною в системі міжнародних перевезень, має розвинену атомну енергетику і складну політичну ситуацію, що збільшує ризики незаконного використання радіоактивних матеріалів [5, 6]. В умовах постійного загострення геополітичних конфліктів та активізації терористичних організацій Україна стикається з необхідністю посилення контролю над переміщенням і використанням радіоактивних матеріалів [7].

Актуальність дослідження обумовлена також зростанням кількості випадків незаконного обігу радіоактивних матеріалів, які фіксуються останнім часом в міжнародних і національних базах даних [8]. Проблема потребує детального аналізу, розробки превентивних заходів і вдосконалення наявних систем контролю [9].

1. Основні загрози незаконного обігу радіоактивних матеріалів

Незаконний обіг радіоактивних матеріалів становить серйозну загрозу через декілька ключових аспектів у вигляді потенційних наслідків:

1. Загроза життю та здоров'ю людей: витоки радіоактивних речовин можуть спричинити захворювання, пов'язані з радіаційним опроміненням, зокрема онкологічні хвороби, генетичні мутації, порушення імунної системи.

2. Екологічні катастрофи: забруднення навколишнього середовища радіоактивними матеріалами має тривалі наслідки, які можуть впливати на ґрунти, водні ресурси та флору з фауною протягом десятиліть [8, 9].

3. Можливість створення радіологічної зброї: терористичні організації можуть використати радіоактивні матеріали для створення радіологічних пристроїв ("брудних бомб"), які можуть бути застосовані для залякування чи реальних атак [4, 5].

4. Економічна нестабільність: інциденти з радіоактивними матеріалами впливають на міжнародні перевезення, торгівлю, туристичну привабливість регіонів, що ускладнює економічну ситуацію як на локальному, так і глобальному рівнях [10].

2. Підрив міжнародної безпеки

Міжнародний досвід у боротьбі з незаконним обігом радіоактивних речовин є дуже важливим для розробки ефективних стратегій та заходів національного та міжнародного рівнів.

Багато країн беруть участь у міжнародних угодах та конвенціях, спрямованих на боротьбу з незаконним обігом радіоактивних речовин. Наприклад, Конвенція про фізичний захист ядерних матеріалів [8] забезпечує міжнародні стандарти та вимоги щодо фізичного захисту ядерних матеріалів під час їх транспортування.

Незаконний обіг радіоактивних матеріалів часто супроводжується нелегальними схемами, що залучають транснаціональні злочинні угруповання, збільшуючи напругу між державами.

Тому здійснюється активна співпраця у сфері обміну інформацією та інтелектуальних ресурсів для виявлення та розслідування випадків незаконного обігу радіоактивних матеріалів. Застосування сучасних технологій та методів контролю дозволяє підвищити ефективність виявлення та перехоплення незаконного обігу радіоактивних матеріалів.

3. Теоретичний огляд проблеми

Радіоактивні матеріали є важливими складовими сучасного світу, використовуються в багатьох сферах людської діяльності, проте водночас становлять серйозну загрозу за умов неналежного поводження або незаконного обігу. Радіоактивні матеріали - це ядерні матеріали, радіоактивні відходи та джерела іонізуючого випромінювання. Найбільш поширеними радіоактивними матеріалами є уран, плутоній (ядерний матеріал), радій, а також низка радіоізотопів, таких як йод-131, кобальт-60 тощо. Їх використання охоплює різні галузі: ядерну енергетику, медицину, промисловість, наукові дослідження та космічну галузь.

У ядерній енергетиці радіоактивні матеріали, як-от уран-235 і плутоній-239, є основними джерелами енергії для атомних електростанцій. Вони забезпечують виробництво електроенергії у великих обсягах, що є важливим для економіки багатьох країн. У медицині радіоактивні ізотопи застосовуються для лікування онкологічних захворювань, діагностики органів і систем, а також у радіотерапії. У промисловості вони слугують для неруйнівного контролю якості матеріалів, визначення щільності та рівня рідин. У наукових дослідженнях радіоактивні матеріали використовуються для вивчення фундаментальних фізичних, хімічних і біологічних процесів. Крім того, у космічній галузі вони забезпечують живлення апаратів, які необхідно забезпечити потужним і тривалим джерелом енергії.

Попри широку корисність, радіоактивні матеріали несуть численні ризики. Основна загроза пов'язана з їхнім іонізуючим випромінюванням, яке може спричинити серйозні наслідки для здоров'я людини. Зокрема, контакт з радіоактивними матеріалами може викликати променеву хворобу, онкологічні захворювання, порушення репродуктивної системи, а також генетичні мутації, які впливають на майбутні покоління. Крім того, радіоактивне забруднення навколишнього середовища, що виникає внаслідок витоків або аварій, може мати тривалі наслідки для екосистем, включаючи ґрунти, водні ресурси та біорізноманіття [3].

Особливу загрозу становить можливість використання радіоактивних матеріалів у терористичних цілях. Терористичні угруповання можуть використовувати їх для створення радіологічної зброї, так званих "брудних бомб", які поширюють радіоактивне забруднення на великі території. Такий сценарій загрожує не лише життю та здоров'ю людей, а й підриває економічну стабільність і політичну безпеку держав. Іншим серйозним ризиком є можливість радіаційних інцидентів під час транспортування або зберігання радіоактивних матеріалів, які можуть стати причиною аварій із багаторічними наслідками.

Сучасний стан незаконного обігу радіоактивних матеріалів обумовлений низкою чинників. Насамперед, це слабкий контроль з боку держав, які мають значні запаси радіоактивних речовин. Недостатня кількість спеціалізованого обладнання для моніторингу на кордонах, брак систем обліку та маркування радіоактивних матеріалів сприяють їхньому незаконному переміщенню. Додатково цьому сприяє корупція у правоохоронних і митних органах, низький рівень професійної підготовки персоналу, а також обмежені фінансові ресурси для забезпечення безпеки.

Не менш важливим фактором є технологічна доступність радіоактивних матеріалів. Старі пристрої, які містять радіоактивні ізотопи, часто залишаються без належного контролю, що створює ризик їхнього потрапляння на чорний ринок. Відсутність глобальної координації між країнами також відіграє значну роль. Відмінності в законодавстві, стандартах безпеки та рівні технічного забезпечення ускладнюють

міжнародну співпрацю в боротьбі з незаконним обігом. Нарешті, геополітична нестабільність, збройні конфлікти та економічні кризи створюють сприятливі умови для діяльності кримінальних угруповань, які займаються контрабандою радіоактивних матеріалів [4].

Отже, незаконний обіг радіоактивних матеріалів є складною і багатогранною проблемою, яка вимагає комплексного підходу для її вирішення [1]. Необхідно розробляти та впроваджувати ефективні заходи контролю, посилювати міжнародну співпрацю, вдосконалювати технології моніторингу та підвищувати рівень підготовки персоналу, відповідального за безпеку.

4. Міжнародний контекст

Незаконний обіг радіоактивних матеріалів становить глобальну проблему, що потребує активної співпраці між державами, міжнародними організаціями та правоохоронними структурами [2]. З огляду на високі ризики, пов'язані з радіоактивними матеріалами, міжнародне співтовариство створило низку нормативно-правових актів, які регламентують заходи безпеки та протидії незаконному обігу. Крім того, значна роль належить таким організаціям, як Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ), яке координує дії країн у цьому напрямі [1].

Одним із ключових документів є Конвенція про фізичний захист ядерного матеріалу, ухвалена у 1980 році [5]. Вона регулює заходи безпеки при використанні, зберіганні та транспортуванні ядерних матеріалів. Конвенція встановлює обов'язки держав-членів щодо запобігання крадіжкам, втраті чи диверсіям радіоактивних матеріалів. Згідно з її положеннями, держави зобов'язані співпрацювати у розслідуванні інцидентів та притягувати до відповідальності осіб, причетних до незаконного обігу. У 2005 році були ухвалені поправки, які розширили сферу дії Конвенції, включивши питання захисту ядерних установок, а також ядерних матеріалів під час їхнього внутрішнього використання.

Серед інших важливих документів виділяється Міжнародна конвенція про боротьбу з актами ядерного тероризму, ухвалена у 2005 році [6]. Вона спрямована на запобігання незаконному використанню радіоактивних матеріалів у терористичних цілях. Конвенція зобов'язує держави встановлювати жорсткий контроль над такими матеріалами та запроваджувати кримінальну відповідальність за їхнє незаконне використання.

Не менш важливою є діяльність Ради Безпеки ООН, яка прийняла низку резолюцій, спрямованих на боротьбу з незаконним обігом радіоактивних матеріалів. Зокрема, Резолюція №1540 (2004 р.) [7] вимагає від держав створення національних механізмів контролю для запобігання потраплянню ядерних, хімічних та біологічних матеріалів до рук терористичних угруповань. Цей документ підкреслює важливість міжнародної співпраці в питаннях обміну інформацією та координації зусиль. Резолюція №1373 (2001 р.) [5], ухвалена після терористичних атак 11 вересня, акцентує увагу на необхідності боротьби з фінансуванням терористів, які можуть використовувати радіоактивні матеріали для створення "брудних бомб".

Важливу роль у міжнародному контексті відіграє МАГАТЕ, яке є основною організацією, що займається питаннями ядерної безпеки. Одним із ключових інструментів агентства є Incident and Trafficking Database (ITDB) – база даних, яка фіксує випадки незаконного обігу ядерних матеріалів [8]. МАГАТЕ також розробляє стандарти безпеки, які держави можуть впроваджувати на національному рівні, організовує навчання для співробітників правоохоронних органів і митниць, а також надає технічну допомогу країнам, що потребують модернізації своїх систем контролю.

Приклади транскордонних інцидентів свідчать про серйозність проблеми. Один із резонансних випадків стався у 2017 році в Словаччині, де поліція затримала злочинну групу, яка намагалася продати 1 кг урану-235. Цей матеріал міг бути використаний для створення "брудної бомби". Інший випадок стався у 2016 році в Грузії, коли було вилучено радіоактивний цезій-137, викрадений із наукової установи. У 2018 році на турецькому кордоні з Грузією митники виявили 18 грамів каліфорнію-252 – рідкісного матеріалу, який може бути використаний у ядерних реакторах або зброї.

Усі ці інциденти демонструють високий рівень загрози, що пов'язаний із незаконним обігом радіоактивних матеріалів. Вони підкреслюють важливість міжнародної співпраці, вдосконалення нормативно-правової бази та посилення контролю. Для зменшення ризиків необхідно не лише впроваджувати сучасні технології моніторингу, а й підвищувати обізнаність працівників правоохоронних структур та широкої громадськості. У цьому контексті діяльність міжнародних організацій, таких як МАГАТЕ, є ключовою для забезпечення глобальної ядерної безпеки.

5. Ситуація в Україні

Україна займає особливе місце у глобальній системі боротьби з незаконним обігом радіоактивних матеріалів через її геополітичне положення, наявність розвиненої атомної енергетики та спадок СРСР у вигляді радіоактивних джерел і матеріалів. Проблема незаконного обігу в країні має історичне коріння, що бере початок у період політичної та економічної нестабільності 1990-х років, але залишається актуальною і сьогодні.

Після розпаду СРСР Україна успадкувала значну кількість ядерних матеріалів, включаючи ті, що використовувалися в науково-дослідних установах, промисловості та військовому комплексі. Однак економічна криза, слабкість державних інституцій і недостатність контролю створили умови для появи чорного ринку радіоактивних матеріалів. У 1990-х роках було зафіксовано численні випадки викрадення та нелегального транспортування радіоактивних речовин. Наприклад: у 1993 році у Києві було затримано групу осіб, які намагалися продати контейнер із цезієм-137, викраденим із промислового підприємства, а у 1997 році правоохоронці виявили спробу перевезення плутонію-239 через західний кордон України – зловмисники планували продати матеріал за кордон, але операцію було припинено завдяки оперативній роботі правоохоронців.

Однією з причин поширення таких випадків була відсутність ефективної системи обліку та маркування радіоактивних матеріалів, а також низький рівень фізичного захисту на багатьох підприємствах і в наукових установах. Значна кількість старого обладнання, яке містило радіоактивні ізотопи, залишалася без належного обліку, що полегшувало його викрадення.

Станом на сьогодні ситуація з незаконним обігом радіоактивних матеріалів в Україні значно покращилася завдяки впровадженню нових технологій моніторингу, міжнародній співпраці та зміцненню законодавчої бази. Проте проблема залишається актуальною через низку факторів [9].

По-перше, географічне положення України, яка є транзитною зоною між Сходом і Заходом. По-друге, збройний конфлікт на сході країни, що послабив контроль на окремих територіях і збільшив ризик контрабанди небезпечних матеріалів.

Згідно з офіційними даними, в Україні щорічно фіксуються десятки випадків незаконного обігу або спроб незаконного транспортування радіоактивних матеріалів. Наприклад, у 2018 році на кордоні з Польщею було зупинена спроба вивезення обладнання з радіоактивними джерелами, яке було викрадене з промислового об'єкта в центральній Україні. У 2021 році на сході країни було виявлено радіоактивний матеріал у зоні, контрольованій незаконними збройними формуваннями.

Незаконний обіг найчастіше пов'язаний із радіоактивними джерелами, які використовуються у промисловості (цезій-137, стронцій-90) та медичних закладах (йод-131, кобальт-60). Незважаючи на значне зменшення кількості таких випадків порівняно з 1990-ми роками, ризик зростання нелегальної діяльності зберігається.

6. Роль правоохоронних органів і спеціальних підрозділів

Правоохоронні органи та спеціальні підрозділи відіграють ключову роль у протидії незаконному обігу радіоактивних матеріалів в Україні. Основними структурами, що займаються цією проблемою, є: Служба безпеки України, Національна поліція України, Державна прикордонна служба України (ДПСУ).

Державна прикордонна служба України оснащена сучасним обладнанням для радіаційного моніторингу, яке дозволяє виявляти навіть незначні рівні радіоактивного випромінювання. У співпраці з митною службою ДПСУ регулярно виявляє спроби незаконного переміщення радіоактивних матеріалів через кордон.

Національна поліція України здійснює оперативно-розшукову діяльність у сфері незаконного обігу радіоактивних матеріалів. Особливу увагу приділяють розслідуванню випадків крадіжки радіоактивних джерел з медичних, промислових і наукових установ.

Служба безпеки України займається боротьбою з організованими злочинними угрупованнями, які займаються контрабандою небезпечних матеріалів. Окрім того, служба координує зусилля з міжнародними партнерами для виявлення мереж постачання та каналів збуту радіоактивних матеріалів. Ця структура відповідає за дотриманням законодавства у сфері використання радіоактивних матеріалів.

Державна інспекція ядерного регулювання розробляє нормативно-правову базу, здійснює нагляд та контроль суб'єктів діяльності у сфері використання ядерної енергії. Україна активно співпрацює з МАГАТЕ та іншими міжнародними організаціями у сфері боротьби з незаконним обігом радіоактивних матеріалів. Країна отримує технічну допомогу, бере участь у тренінгах та обміні досвідом, що дозволяє вдосконалювати національну систему безпеки [8].

7. Сучасні завдання з вирішення проблем незаконного обігу

Проблема незаконного обігу радіоактивних матеріалів залишається важливим викликом для національної та міжнародної безпеки. Ефективна боротьба з цим явищем потребує як вдосконалення існуючих підходів, так і впровадження нових технологій та стратегій. У цьому контексті важливим є розвиток системи раннього попередження, інтеграція з міжнародними базами даних та посилення санкцій за порушення, пов'язані з обігом радіоактивних матеріалів [5].

Одним із ключових напрямів є розвиток системи раннього попередження, яка дозволить швидко реагувати на інциденти, пов'язані з радіоактивними матеріалами. Це включає впровадження сучасних засобів моніторингу, таких як стаціонарні та мобільні детектори радіації, здатні виявляти навіть низькі рівні іонізуючого випромінювання. Удосконалення технічного забезпечення на пунктах пропуску через

державний кордон є критично важливим, оскільки саме кордони часто стають місцем незаконного транспортування. Важливо також забезпечити регулярне навчання персоналу, який працює із засобами радіаційного моніторингу, щоб підвищити його компетентність та ефективність у виявленні загроз.

Іншим важливим аспектом є інтеграція з міжнародними базами даних, такими як Incident and Trafficking Database (ITDB) МАGATE. Така інтеграція дозволить оперативно отримувати інформацію про випадки незаконного обігу радіоактивних матеріалів у світі, аналізувати тенденції та ефективніше виявляти можливі канали незаконного переміщення матеріалів. Крім того, важливо впроваджувати спільні міжнародні операції та обмін інформацією між правоохоронними органами різних країн для нейтралізації транснаціональних злочинних груп. Інтеграція з міжнародними системами також сприятиме виявленню прогалин у національній системі безпеки та дозволить адаптувати кращі міжнародні практики до умов конкретної країни [7].

Не менш важливим заходом є посилення санкцій за порушення, пов'язані з незаконним обігом радіоактивних матеріалів. Чинне законодавство має бути вдосконалене, щоб гарантувати невідворотність покарання для осіб, причетних до таких злочинів. Окрім того, штрафи, терміни ув'язнення та інші види покарань мають бути посилені, щоб створити стримувальний ефект для потенційних злочинців. Особлива увага повинна приділятися організаторам та посередникам у мережах контрабанди радіоактивних матеріалів, оскільки вони є ключовими фігурами у поширенні незаконного обігу.

Висновки

Незаконний обіг радіоактивних матеріалів становить серйозну загрозу як для національної, так і для міжнародної безпеки. Основні проблеми пов'язані з недостатнім технічним забезпеченням, слабким міжнародним співробітництвом у цій сфері та недосконалістю законодавчих механізмів. Для вирішення цих проблем необхідно впроваджувати комплексний підхід, який поєднує технічні, правові та організаційні заходи.

Попередження незаконного обігу радіоактивних матеріалів має велике значення для забезпечення глобальної безпеки. Воно дозволяє запобігти екологічним катастрофам, терористичним актам із використанням радіоактивних матеріалів і порушенням міжнародної стабільності. Посилення контролю за обігом радіоактивних матеріалів сприятиме зміцненню довіри між країнами та підвищенню ефективності міжнародних зусиль у боротьбі з цією загрозою.

Перспективи подальших досліджень у цій сфері включають розробку нових технологій виявлення радіоактивних матеріалів, аналіз економічних і соціальних наслідків незаконного обігу, а також вдосконалення правових механізмів міжнародного співробітництва. Особлива увага має бути приділена розвитку інноваційних методів навчання персоналу, який працює у сфері моніторингу та безпеки, а також створенню нових алгоритмів взаємодії між країнами для швидкого реагування на інциденти. Таким чином, боротьба з незаконним обігом радіоактивних матеріалів залишається одним із ключових напрямків діяльності у сфері глобальної безпеки.

Список використаної літератури

1. Браун Дж. Р. "Ядерна безпека: сучасні виклики і технології контролю". Рік: 2020. Видавництво: Наукова думка, Київ. 248 с.
2. Ковальчук В. О. "Радіоактивні матеріали у контексті національної безпеки України". Рік: 2020. Видавництво: Каменярь, Львів. 167 с.
3. Глобальна ініціатива (GICNT). "Посібник із міжнародної співпраці у сфері радіаційної безпеки". Рік: 2022. Видавництво: OECD, Париж. 114 с.
4. Сміт Д., Пітерс К. "Незаконний обіг радіоактивних матеріалів: міжнародний контекст". Рік: 2019. Видавництво: Routledge, Лондон. 320 с.
5. Кузнецов П. І. "Історія та сучасний стан боротьби з ядерним тероризмом". Рік: 2022. Видавництво: Ліра, Дніпро. 276 с.
6. Олексійчук Р. М., Бондаренко І. А. "Законодавчі аспекти регулювання обігу радіоактивних матеріалів". Рік: 2020. Видавництво: Фенікс, Одеса. 132 с.
7. Рада Безпеки ООН. "Резолюції Ради Безпеки з питань ядерної безпеки та боротьби з тероризмом (1540, 1373)". Рік: 2019. Видавництво: ООН, Нью-Йорк. 92с.
8. МАGATE. "Нормативні стандарти фізичного захисту ядерних матеріалів". Рік: 2018. Видавництво: МАGATE, Відень. 145 с.
9. Ткаченко О. В. "Радіаційна безпека в Україні: проблеми і перспективи". Рік: 2021. Видавництво: Право, Харків. 189 с.
10. Вілсон Т. "Технології моніторингу та виявлення радіоактивних матеріалів". Рік: 2021. Видавництво: Springer, Вашингтон. 210 с.

P. Krytskiy¹, master student, ORCID 0009-0001-3897-6362.

S. Klevtsov¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-1405-5048.

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

MODERN PROBLEMS OF THE ILLICIT TRAFFICKING OF RADIOACTIVE MATERIALS

Modern problems of the illicit trafficking of radioactive materials pose a serious threat to global security, ecology and human health.

The article provides number of events dealt with the prevention of the illicit trafficking of radioactive materials as in Ukraine so in other countries. Reasons of the occurrence of radioactive materials out of regulatory control are considered. Having analyzed the key aspects of the problem, it is possible to apply the reasons for its occurrence, in particular, insufficient control over radioactive materials, the weakness of regulatory mechanisms in a number of countries, as well as the growth of terrorist and criminal threats. The article examines the consequences of the illegal circulation of radioactive materials for society, such as the risks of radiation contamination, an increase in the level of terrorist activity, and economic losses.

Special attention is paid to the analysis of international efforts to combat the illicit circulation of radioactive materials, including the activities of such organizations as the International Atomic Energy Agency (IAEA) and the Global Initiative to Combat Acts of Nuclear Terrorism. The role of modern monitoring technologies, integrated surveillance systems and automation of control processes is highlighted.

Ways to increase the effectiveness of countermeasures are proposed, including improving international legislation, creating a global database of radioactive materials, increasing the level of professional training of personnel responsible for control of radioactive materials, as well as strengthening information interaction between states. The article is a contribution to the scientific discussion of the problem and offers specific practical measures aimed at reducing the risks associated with the illegal circulation of radioactive materials.

Keywords: *radioactive materials out of regulatory control, illicit trafficking of radioactive materials, illegal use of radioactive materials, nuclear terrorism, "dirty bomb", environmental disaster, radioactive contamination of the environment, nuclear security.*

References

1. Brown J. R. "Nuclear safety: modern challenges and control technologies". Year: 2020. Publisher: Naukova dumka, Kyiv. 248 p.
2. Kovalchuk V. AT. "Radioactive materials in the context of national security of Ukraine". Year: 2020. Publisher: Kamenyar, Lviv. 167 p.
3. Global initiative (GICNT). "Handbook on international cooperation in the field of radiation safety". Year: 2022. Publisher: OECD, Paris. 114 p.
4. Smith D., Peters K. "Illicit trafficking of radioactive materials: international context". Year: 2019. Publisher: Routledge, London. 320 p.
5. Kuznetsov P. AND. "History and current state of combating nuclear terrorism". Year: 2022. Publisher: Lira, Dnipro. 276 p.
6. Oleksiichuk R. M., Bondarenko I.A. "Legislative aspects of regulating the circulation of radioactive materials". Year: 2020. Publisher: Fenix, Odesa. 132 p.
7. UN Security Council. "Security Council Resolutions on Nuclear Safety and Combating Terrorism (1540, 1373)". Year: 2019. Publisher: UN, New York. 92 p.
8. IAEA. "Regulatory standards of physical protection of nuclear materials". Year: 2018. Publisher: IAEA, Vienna. 145 p.
9. Tkachenko O. V. "Radiation safety in Ukraine: problems and prospects". Year: 2021. Publisher: Pravo, Kharkiv. 189 p.
10. Wilson T. "Technologies of monitoring and detection of radioactive materials". Year: 2021. Publisher: Springer, Washington. 210 p.

Надійшла: 18.01.2025

Received: 18.01.2025