

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ В ПТАШНИКУ ПРИ БІЧНІЙ ВЕНТИЛЯЦІЇ

Запропонований новий спосіб охолодження зовнішнього повітря у вентиляційних системах пташників, який базується на використанні води з підземних свердловин та теплообмінників рекуператорів для охолодження припливного повітря.

У птахівничому приміщенні пропонується бокова система охолодження в літній період року при температурі зовнішнього повітря +40 °С. У припливні клапана, із зовнішньої сторони пташника, монтуються теплообмінні апарати. Їх кількість складає 40 шт для половини пташника з поперечними розмірами 0,85x0,3 м.

Проведено чисельне моделювання процесів аеродинаміки і теплопереносу в пташниках при тунельній системі вентиляції. В результаті чисельних розрахунків отримано розподіл температур, швидкостей і тисків в повітряному середовищі пташника. У певних точках, в районі входу у припливних клапанів, максимальна швидкість повітря досягає до 11,62 м/с. Тиск на вході в припливні клапани досягає 78,298 Па. Така поведінка говорить про те, що важче охоложене повітря базується ближче до птиці, а більш нагріте піднімається вгору.

Із розподілу температур у різних перерізах в пташнику спостерігаємо, що охоложене повітря з теплообмінних апаратів температурою +20 °С направляється від клапанів в пташник. Проходячи близько 1,5 м нагрівається і холодний потік розосереджується по приміщенні. Середня температура на цих ділянках складає в межах від +24,44 °С до +26,67 °С. Враховуючи велику довжину пташника, поблизу стінки 1,5...0,5 м, відбувається температурна застійна зона, яка коливається від +27 °С до +32 °С.

Використання теплообмінників для охолодження припливного повітря дає можливість підтримувати його температуру на рівні +20-25 °С та знизити показники вологовмісту в птахівничих приміщеннях, які є високими при використанні для охолодження припливного повітря касетних методів або розпилювання води форсунками.

Ключові слова: CFD, бокова система вентиляції, система охолодження, пташник, теплообмінний апарат.

Вступ

Традиційною системою охолодження в пташниках для забезпечення нормованого мікроклімату в приміщенні є охолодження з прямим випаровуванням (ОПВ) [1, 2]. У цих системах 100 % свіжого зовнішнього повітря всмоктується через випарні охолоджувальні касети на бічних стінках, щоб відповідати вищезазначеним обмеженням щодо тепла та якості повітря [3]. Отже, температура повітря охолоджується до вологого термометра, одночасно збільшуючи вміст вологи. Крім того, ОПВ підвищує вологість припливного повітря, тим самим зменшуючи тепловіддачі від курей [4]. Окрім теплового стресу, висока вологість у приміщенні призводить до інших несприятливих наслідків для здоров'я, оскільки збільшується кількість аміаку, який виділяється курячим послідом [5]. Це призводить до зменшення споживання курми корму та виробництва яєць, а також збільшення рівня смертності, що веде до зниження виробництва та прибутку галузі. Виходячи із цих численних труднощів, з якими стикається птахівницька промисловість, можливість створити відповідну сталу систему охолодження для пташників у регіоні Катару є гострою потребою.

Сучасні системи охолодження припливного повітря в пташниках [6, 7] базуються на використанні розпилювальних або випарних систем. В основі обох систем лежить принцип адіабатного охолодження [8], коли вода переходить із рідкого стану в газоподібний унаслідок вільного випаровування, що дозволяє знижувати температуру зовнішнього нагрітого повітря в птахівничих приміщеннях.

У розпилювальних пристроях типу форсунок або дискових розпилювачів утворюється аерозоль або спрей, що містить краплі води малого діаметра [9]. Форсунки бувають двох типів, а саме: низького і високого тиску води. За застосування для охолодження повітря форсунокового методу передбачається наявність спеціальної системи водопідготовки – очищення, фільтрування й т. п., оскільки високий вміст солей швидко виводить із ладу роботу форсунок. Крім того, експлуатація таких систем вимагає великих витрат електричної енергії.

Недоліками касетного методу є високий аеродинамічний опір і велика вартість установки. До недоліків указанного методу можна віднести також засмічування касетних каналів пилом у процесі експлуатації. Слід зазначити, що на засміченій поверхні касети утворюється цвіль, яка вносить у

припливне повітря компоненти, що за високої вологості повітря сприяє збудженню в птиці різних хворіб. У разі невчасного очищення касет на їхній поверхні можуть вирости водорості. Указані чинники спонукають до частой заміни касет уже на першому році експлуатації. Максимальний строк роботи касет не перевищує 10 років і залежить від якості води, профілактичних робіт та режиму експлуатації. Ефективність касетного охолодження великою мірою залежить також від герметичності пташника.

Мета і завдання.

Удосконалення системи охолодження в повітряному середовищі пташника за рахунок монтажу теплообмінних апаратів на бічній стінці загалом 80 шт. Як науковою складовою є дослідження процесів гідродинаміки та теплообміну в повітряному середовищі пташника з удосконаленням розташування як вентиляційного обладнання, так і теплообмінних апаратів які дотикаються до припливних клапанів.

Матеріали та методи досліджень

Досліджується система охолодження припливного повітря в пташнику. Розмір якого складає 120×21 м. Підлога виконана з двох шарів бетону товщиною 0,1 м, зверху і знизу, між якими знаходиться полістирол товщиною 0,05 м. У місцях на відстані 2 м від стін, товщину теплоізоляційного матеріалу збільшено до 0,1 м. Стіни виконані як тришарові, з обох сторін наявні два шари бетону товщиною 0,06 м, між якими знаходиться шар полістиролу товщиною 0,1 м. Для спрощення моделі, перекриття виконано як тришарове, яке із зовнішньої і внутрішньої сторони виконане з бетону, між якими знаходиться шар теплоізоляційного матеріалу izovat 30 товщиною 0,1 м.

Враховуючи «симетрію» граничних умов на бокових стінках пташника ми розглядаємо тільки половину пташника (див. рис. 1), що дає змогу зменшити використання комп'ютерних ресурсів.

У пташничому приміщенні пропонується бокова система охолодження в літній період року при температурі зовнішнього повітря +40 °С. У припливні клапана, із зовнішньої сторони пташника, монтуються теплообмінні апарати. Їх кількість складає 40 шт для половини пташника з поперечними розмірами 0,85x0,3 м. В якості охолоджувача являється вода з підземних свердловин. Із попередніх досліджень авторів [10], які розробляли теплообмінні апарати для такої системи охолодження, представлено детальні дослідження. Аналізуючи результати, через такі теплообмінники, зовнішнє тепле повітря проходить через нього і буде охолоджуватись до +20 °С.

Витяжні вентилятори розташовуються на задній торцевій стінці, в кількості 5 шт, беручи із рекомендацій авторів дослідження [11], із загальною продуктивністю 42,815 кг/с.

Ця кількість повітря є достатньою для видалення надлишкової теплоти з пташника. Взято до уваги і припливні клапани, висота розташування яких від рівня перекриття складає 0,21 м. Кут нахилу спойлера над клапаном 73°. Довжина спойлера 0,2 м. Задіяно 40 клапанів для половини пташника. Клапани Wlotpowietrza 3000-VFG мають ширину 0,86 м, а висота відкривання їх складає 0,09 м.

На усіх зовнішніх стінах і перекритті задавались граничні умови третього роду (див. рис. 1), при зовнішній температурі повітря +40 °С і величині коефіцієнта тепловіддачі 10 Вт/м²К, який характерний для середніх швидкостей зовнішнього вітрового потоку. Припускаємо, що температура ґрунту, що прилягає до нижнього бетонного шару підлоги, складає +10 °С.

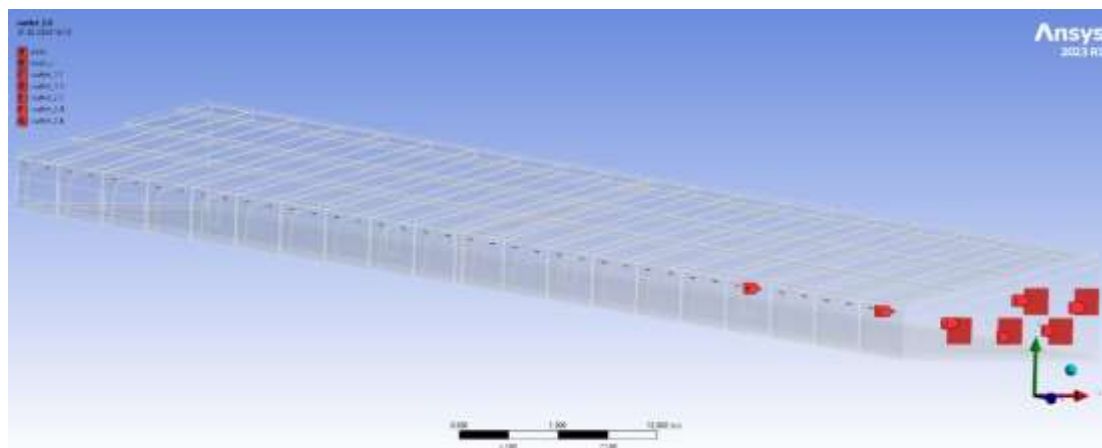


Рисунок 1 – Геометрія 3D пташника із зазначенням граничних умов

Геометрію пташника виконано в ANSYS Design Modeler 2023 R1 і виставлено граничні умови. Після чого геометрію передано в ANSYS Meshing 2023 R1 для побудови сітки. Побудова сітки виконана за допомогою методу CutCell. Мінімальний розмір грані – 0,015 м. Максимальний розмір грані – 0,12 м. Для припливних клапанів та витяжних вентиляторів сітку згущували з мінімальними розмірами елемента 0,01 м та 0,04 м відповідно. Згущення сітки виконано для більш точніших результатів при моделювання на

вході та виході з пташника. Як результат, показник якості сітки orthogonal quality складає 0,214, кількість елементів 4485116 шт, а кількість вузлів 4854992 шт. Результати побудованої сітки можна побачити на рис. 2.

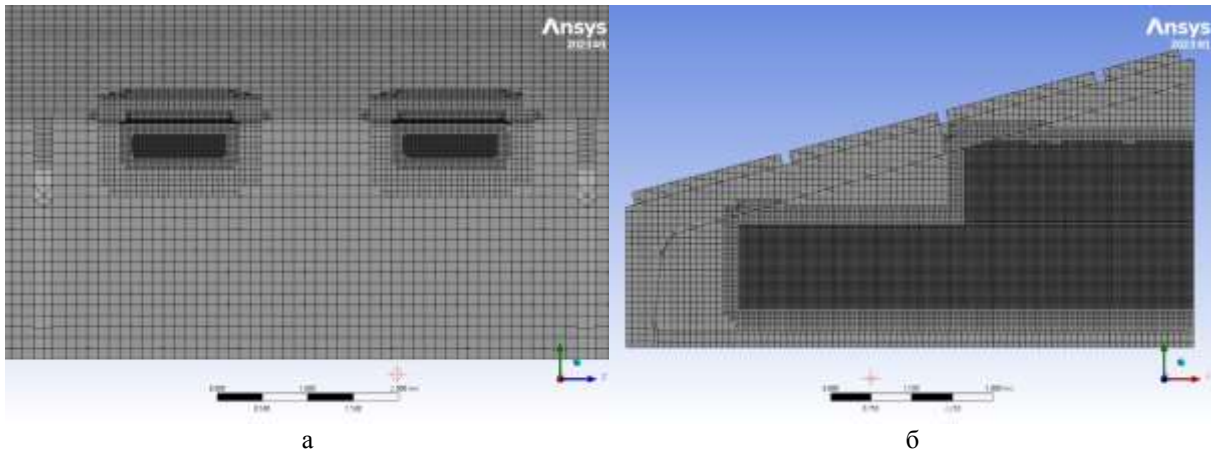


Рисунок 2 – Сітка в повітряному середовищі пташника:
а – бокова стінка; б – задня торцева стінка

Чисельне моделювання проводилось безпосередньо в ANSYS Fluent 2023 R1. У моделі застосовувались рівняння Navier-Stokes, стандартна модель турбулентності k-ε і модель випромінювання Discrete Ordinates.

Результати досліджень

На рис. 4-10 показано результати чисельного моделювання пташника на чотирьох ділянках (рис. 3) по довжині приміщення – 10,25 м, 43,25 м, 74,75 м і 109,25 по осі ху. Перша і друга ділянки – середина 4-го припливного клапана і 15-го відповідно. Третя – між 25-м та 26-м припливними клапанами. Четверта ділянка – на середині 37-го припливного клапана. По довжині пташника розташовано 40 припливних клапани, із теплообмінними апаратами.

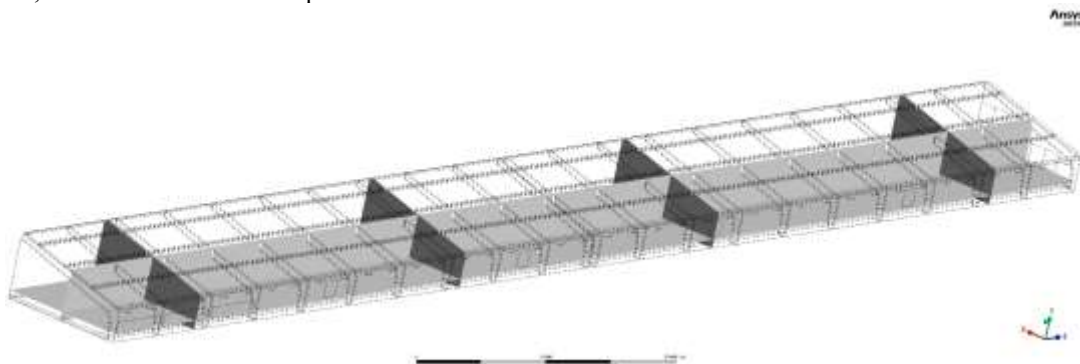


Рисунок 3 – Перерізи виведених результатів чисельного моделювання

На ділянках 1, 2 та 4 відображено лінії потоку в пташнику (див. рис. 4а, 4б, 4г, 5а, 5б, 5г). Спостерігаємо, що клапани та спойлери розташовані не достатньо вдало. Потік повітря виходить з клапанів зі швидкістю 11,485 м/с. Досягаючи, практично, середини пташника і направляєється вниз, втрачаючи швидкість, до птиці. Між стрімким потоком повітря і птицею створюється великий вихор, який забезпечує подачу свіжого повітря птиці. У верхній частині пташника, по середній лінії, створюється малий вихор повітря через специфічну конструкцію пташника. А також відбувається поділ повітряного потоку, через інтенсивну його подачу. Що супроводжує турбулентність потоку повітря, на цих ділянках, та інтенсивне перемішування свіжого повітря із відпрацьованим. У певних точках, в районі входу у припливних клапанів, максимальна швидкість повітря досягає до 11,62 м/с. Тиск на вході в припливні клапани досягає 78,298 Па.

В свою чергу, між 25-м та 26-м припливними клапанами (див. рис. 4в, 5в), швидкість повітря досягає 1,3 м/с. Повітря рівномірно видаляється із пташника.

Швидкість повітря на трьох вентиляторах які розташовані у нижній лінії складає 5,148 м/с, а тиск - 4,045 Па, однак на верхніх двох вентиляторах швидкість складає 4,871 м/с, а тиск -3,575 Па (рис. 7). Така поведінка говорить про те, що важче охоложене повітря базується ближче до птиці, а більш нагріте піднімається вгору.

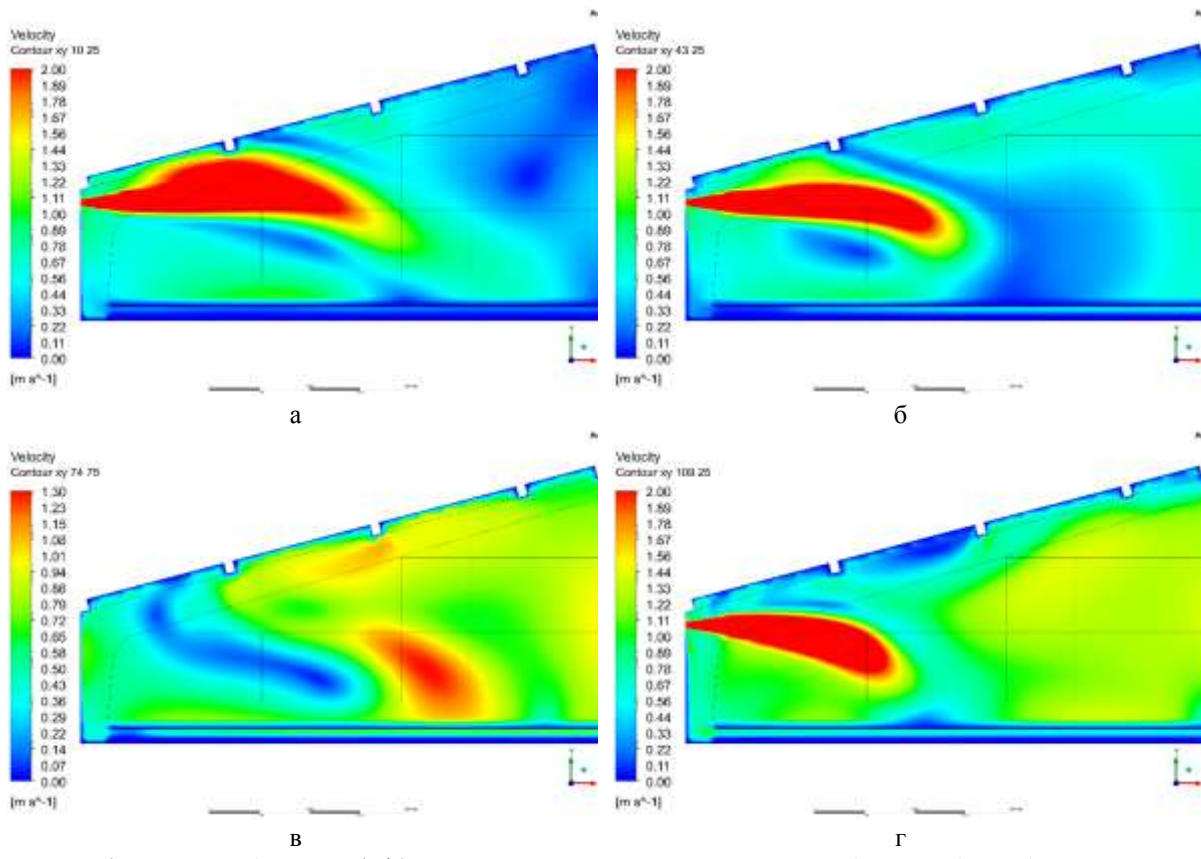


Рисунок 4 – Поле швидкостей (м/с) у приміщенні пташника по осі x у на відстані від передньої торцевої стінки: а – 10,25 м; б – 43,25 м; в – 74,75 м; г – 109,25 м.

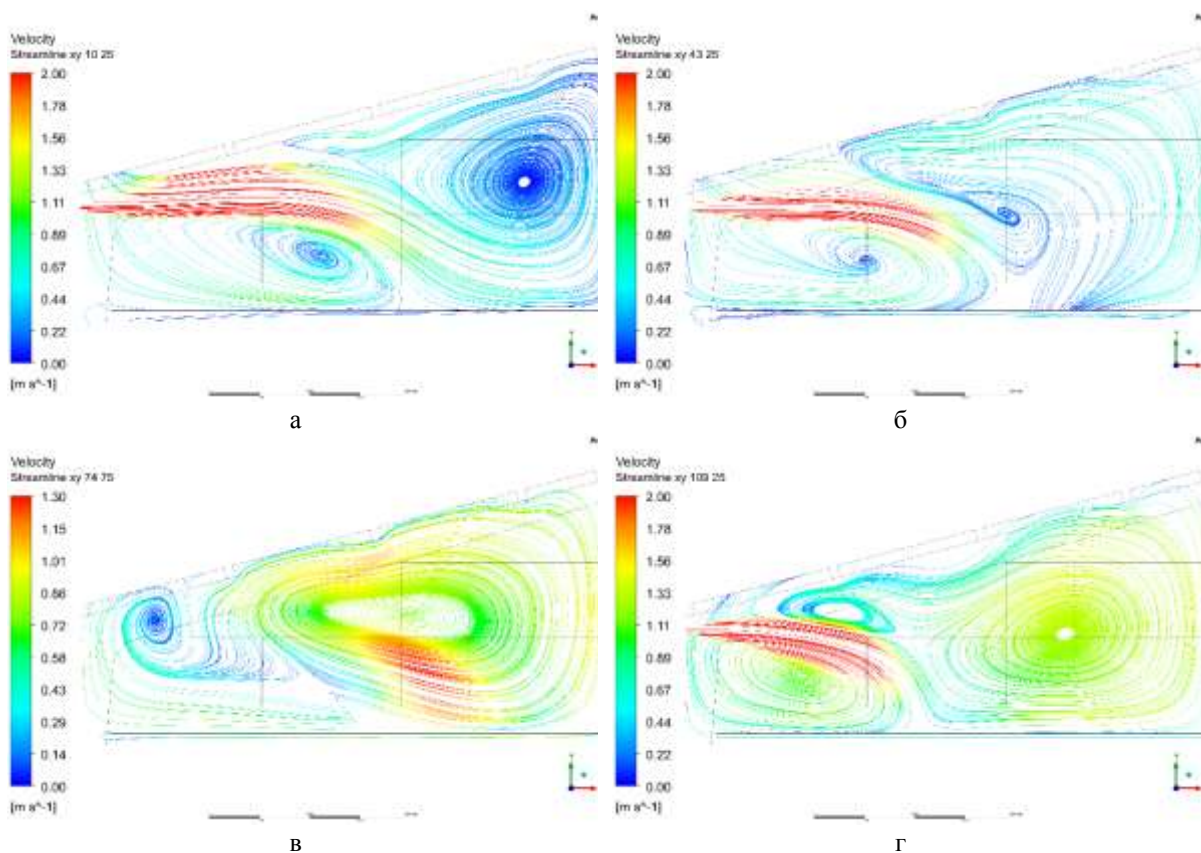


Рисунок 5 – Лінії потоку (м/с) у приміщенні пташника по осі x у на відстані від передньої торцевої стінки: а – 10,25 м; б – 43,25 м; в – 74,75 м; г – 109,25 м.

На рис. 6 представлено розподіл температур у різних перерізах в пташнику. Як бачимо, охолоджене повітря з теплообмінних апаратів температурою $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 6а, б, г), направляється від клапанів в пташник. Проходячи близько 1,5 м нагрівається і холодний потік розосереджується по приміщенні. Середня температура на цих ділянках складає в межах від $+24,44\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+26,67\text{ }^{\circ}\text{C}$. Враховуючи велику довжину пташника, поблизу стінки 1,5 м (рис. 6г) і 0,5 м (рис. 6а, б, в), відбувається температурна застійна зона, яка коливається від $+27\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+32\text{ }^{\circ}\text{C}$. У моделі приведені припущення, що птиця не розміщена на відстані 0,6 м від стіни. Таким чином, лише дуже мала кількість птиці буде відчувати певний дискомфорт (рис. 6г). Поблизу перекриття на не великій відстані, близько 0,15 м, температура коливається від $+28\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ці підвищені температури супроводжуються через високу температуру зовнішнього повітря ($+40\text{ }^{\circ}\text{C}$) та інтенсивність сонячного випромінювання. На рис. 6в представлено температурне поле між 25-м та 26-м припливними клапанами. Температура на цій ділянці дещо нижча, від $+24,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+25,96\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це супроводжене через те, що відсутня подача охолодженого повітря на цій ділянці.

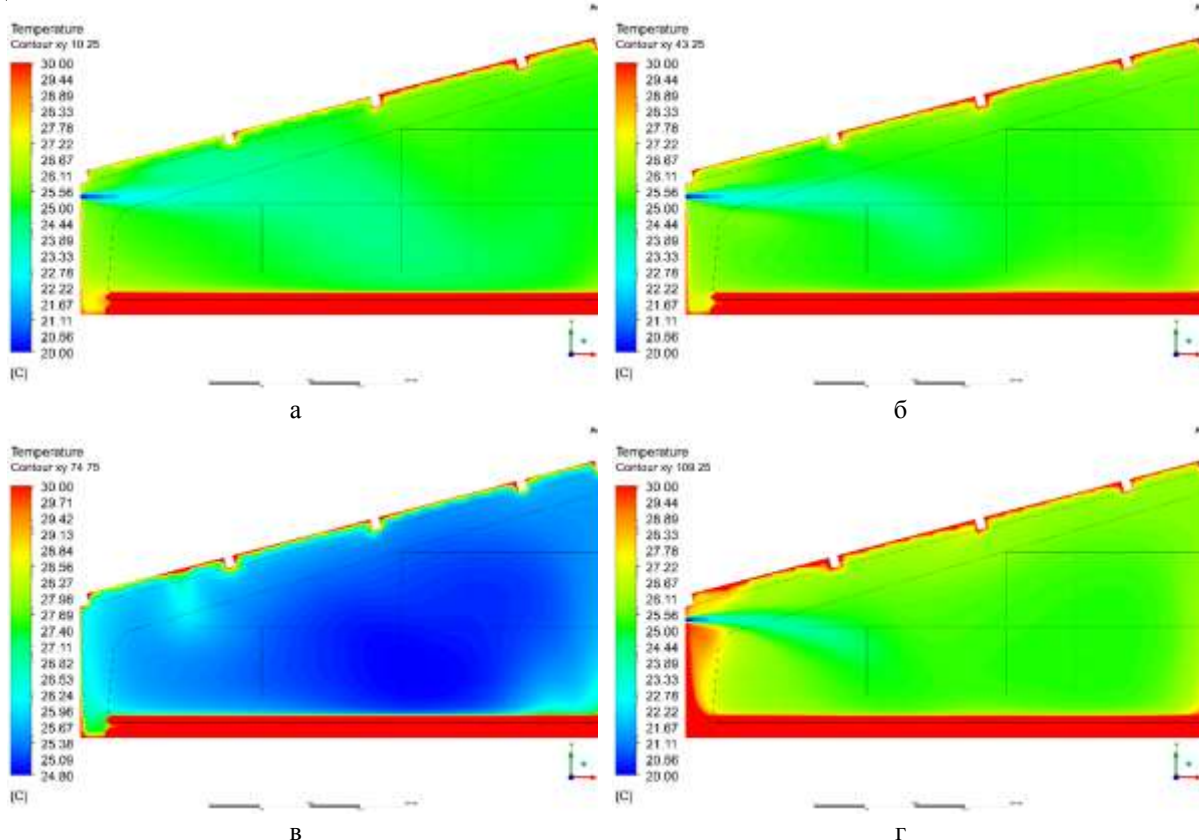


Рисунок 6 – Поле температур ($^{\circ}\text{C}$) у приміщенні пташника по осі ху на відстані від передньої торцевої стінки: а – 10,25 м; б – 43,25 м; в – 74,75 м; г – 109,25 м.

На рис. 8 представлено поле швидкостей (рис. 8а) та поле температур (рис. 8б) на висоті 0,7 м від рівня підлоги. Дані результати є найбільш цікавими та важливими, так як птиця знаходиться на підлоговому утриманні. Враховуючи норми технічного утримання птиці, швидкість повітря поблизу птиці не повинно перевищувати 2 м/с, тому результати на рис. 5а показано в межах від 0 м/с до 2 м/с. З огляду на результати представлені на рис 3 та високі швидкості повітря на вході у припливних клапанів, які досягають 11,62 м/с, лише у малих зонах швидкість повітря перевищує 2 м/с. Усереднена швидкість повітря на ділянці (див. рис. 8а) складає 0,72447 м/с, а тиск $-0,385\text{ Па}$ (див. рис. 8в). Ці результати показують достатню ефективність системи вентиляції в пташнику.

Температура повітря у жаркий період року поблизу птиці не повинна перевищувати $+28\text{ }^{\circ}\text{C}$. З огляду результатів чисельного моделювання (див. рис. 8б), температура повітря, яка перевищує $+28\text{ }^{\circ}\text{C}$, займає площу не більше 0,46 %. Це показує хорошу ефективність системи охолодження пташника. По середині пташника спостерігаються дещо нижчі температури повітря, які починаються з $+24,59\text{ }^{\circ}\text{C}$. Усереднена температура по всій площі пташника на висоті 0,7 м від рівня підлоги складає $+25,6987\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 9-10 показано розподіл швидкостей повітря в 3D пташнику у межах від 0 до 2 м/с.

Як бачимо, клапани працюють ефективно, подаючи свіже охолоджене повітря практично до центру пташника. Близько із середини пташника, його загальної довжини, повітря із клапанів уже не так інтенсивно подає. Спостерігається певне затухання, це супроводжується через наближення повітря до

втяжних вентиляторів. Як уже сказано вище, нижні три вентилятори затягують більшу частину охолодженого повітря. Таким чином, клапани не мають змоги подавати повітря до центру пташника.

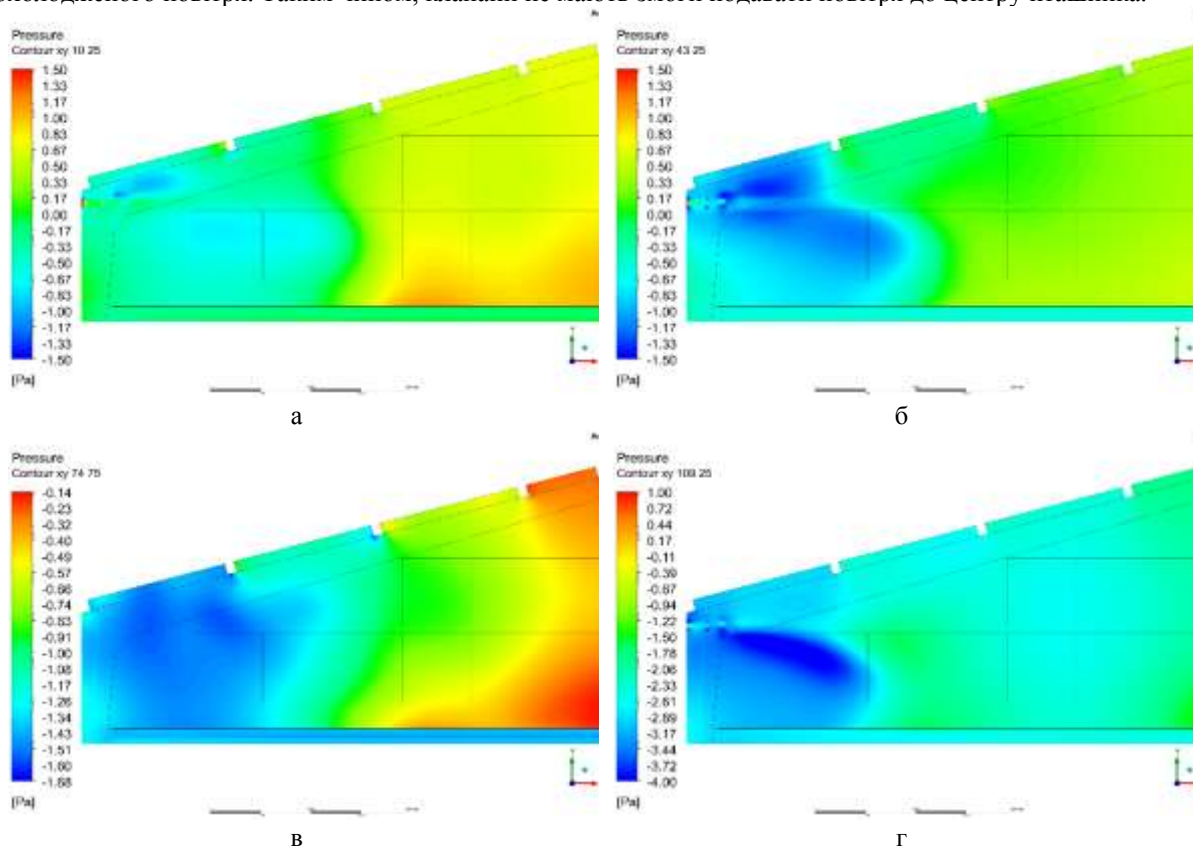


Рисунок 7 – Поле тисків (Па) у приміщенні пташника по осі ху на відстані від передньої торцевої стінки: а – 10,25 м; б – 43,25 м; в – 74,75 м; г – 109,25 м.

Подяка

Міністерству освіти та науки України за фінансову підтримку проєктів молодих вчених (Київ), № 110/1М-пр-2022.

Висновки

1. Результатом чисельного моделювання було досліджено систему охолодження у жаркий період року з температурою зовнішнього повітря $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 3D для половини пташника. Запропоновано нову систему охолодження пташників за допомогою теплообмінного обладнання, на виході температура якого буде складати $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. В якості охолоджувача пропонується вода з підземних свердловин.

2. Розроблено математичну модель аеродинаміки і теплопереносу в пташнику. В результаті чисельного моделювання отримано розподіли температур, швидкостей та тисків в приміщенні пташника. В результаті проведеного аналізу поля температур в пташнику показано, що на окремих ділянках температура в середньому складає від $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+27,22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким чином, враховуючи отримані розподіли температур і швидкостей від рівня підлоги до позначки 0,7 м, можна зробити висновок, що при запропонованій системі охолодження дискомфорт відчуватиме не більше 0,46% від загальної кількості птиці. Усереднена швидкість повітря складає 0,72447 м/с, а температура $+25,6987\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає нормованим показникам.

3. Перевагою запропонованої системи охолодження припливного повітря у порівнянні з існуючими полягає в тому, що розподіли температур повітря в пташнику близькі до нормованих і не перевищують $+28\text{ }^{\circ}\text{C}$ у літній період року. Наступною перевагою є зменшення відносної вологості повітря в пташнику, оскільки використання касет випарного охолодження або розпилення води форсунками призводить до перевищення нормованих показників вологості повітря. Це дає змогу покращити параметри мікроклімату та підвищити продуктивність птахофабрики в цілому.

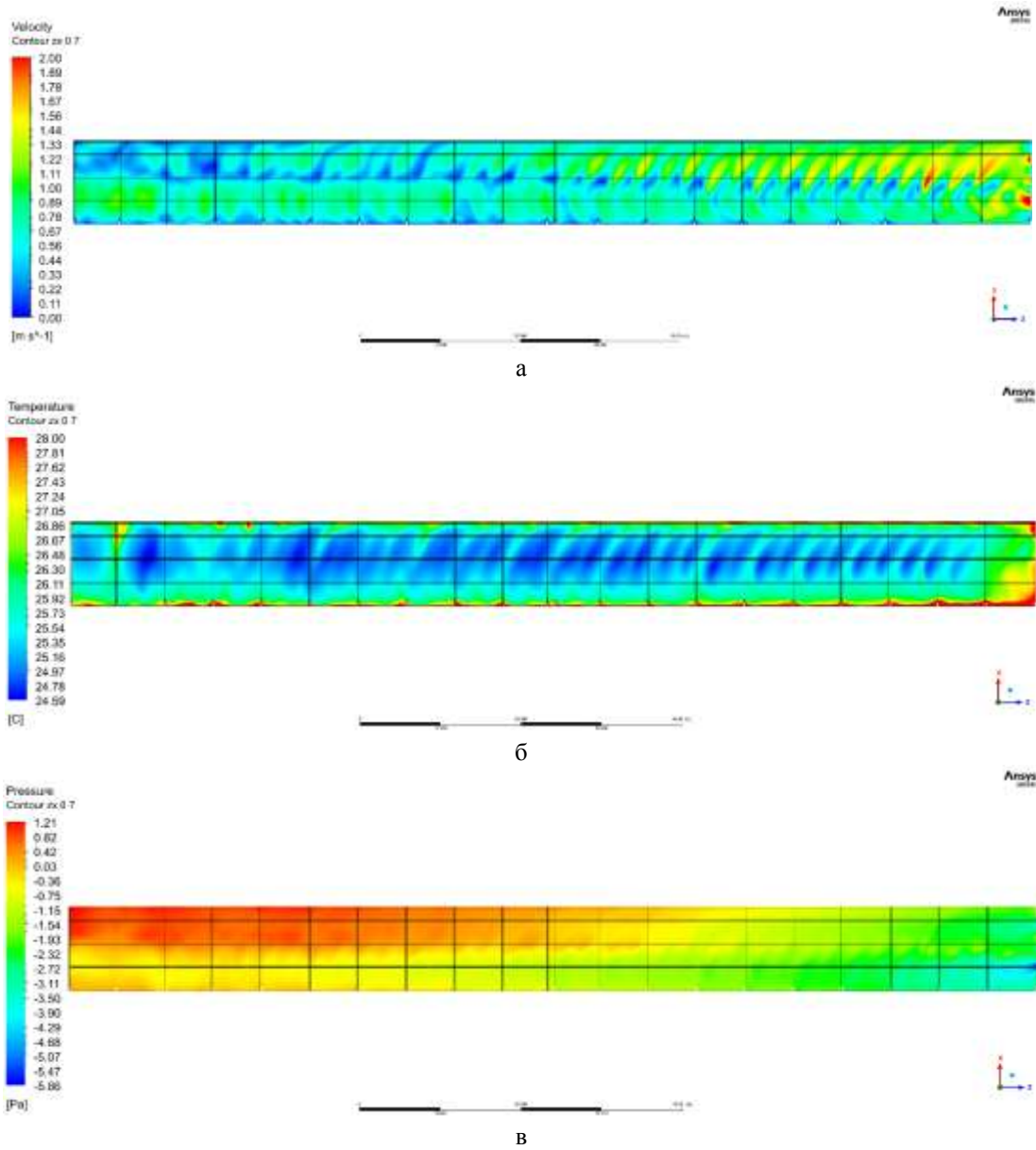


Рисунок 8 – Поле швидкостей, m/s (а), поле температур, $^{\circ}\text{C}$ (б) і поле тисків, Pa (в) у приміщенні пташника по осі zx на висоті 0,7 м від рівня підлоги

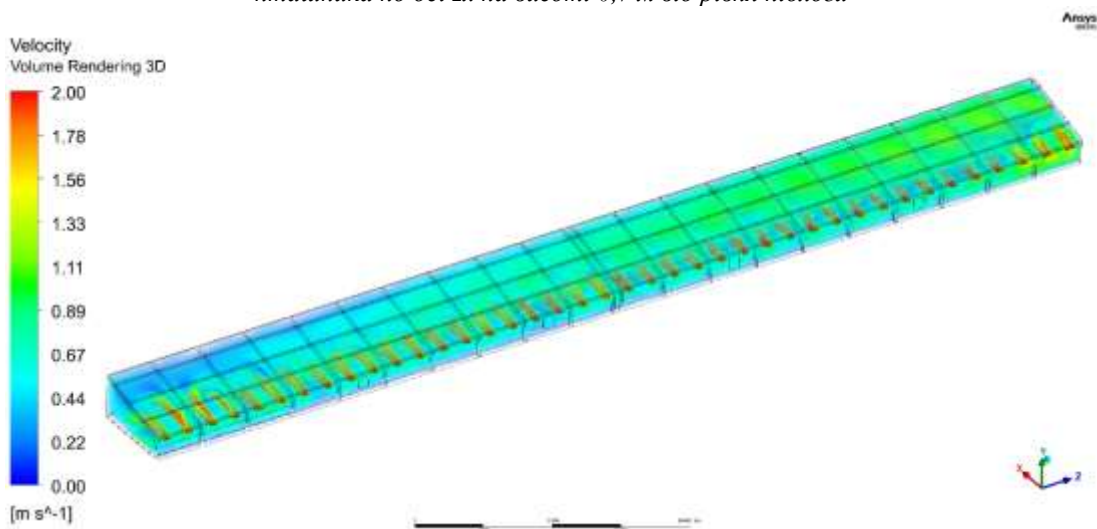


Рисунок 9 – Візуалізація швидкості повітря пташника в межах від 0 до 2 m/s

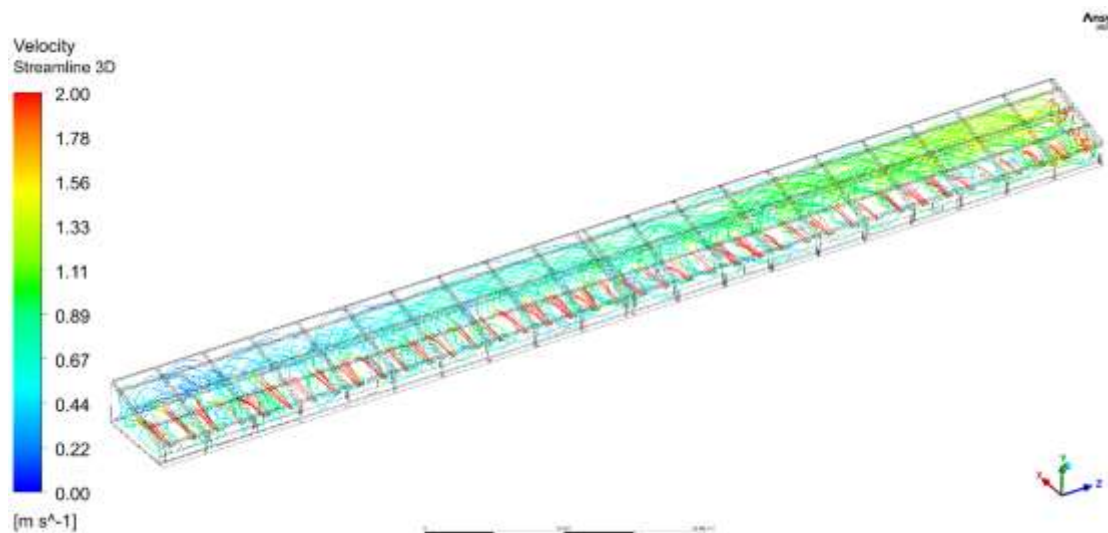


Рисунок 10 – Лінії потоку повітря пташника в межах від 0 до 2 м/с

Список використаної літератури

1. Hoff S. J. (2018). HVAC System. London : “Intech Open Limited”, 2018. 170 с.
2. Liang Y., Tabler G. T., Dridi S. Sprinkler technology improves broiler production sustainability: from stress alleviation to water usage conservation: A mini review. *Front Veterinary Sci*, 2020. Т. 7. С. 689.
3. Investigating applicability of evaporative cooling systems for thermal comfort of poultry birds in Pakistan / H. M. U. Raza та ін. *Applied Sciences*. 2020. Т. 10, № 13. 4445. <https://doi.org/10.3390/app10134445>.
4. The effect of heat stress on ovarian function of laying hens / I. Rozenboim та ін. *Poultry Science*, 2007. Т. 86, № 8. С. 1760-1765. <https://doi.org/10.1093/ps/86.8.1760>.
5. Kristensen H. H., Wathes, C. M. Ammonia and poultry welfare : a review. *World's Poultry Science Journal*. 2000. Т. 56, № 3. С. 235–245. <https://doi.org/10.1079/WPS20000018>.
6. James O. Donald. Technology of microclimate of broiler house. *Aviagen Brands*. Huntsville, USA. 2012.
7. Czarick, M., Fairchild. B. Plastic cooling pads are found to be less efficient comparing to paper cool pads, Poultry Housing Tips. *College of Agricultural and Environmental Sciences*. 2014. Т. 24, № 8. С. 64–69.
8. New control strategy against temperature sudden-drop in the initial stage of pad cooling process in poultry houses / X. Hui та ін. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018. Т. 11, № 1. С. 66–73. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.2479>.
9. 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers / K. Kim та ін. *Biosystems Engineering*. 2008. Т. 100, № 2. С. 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.03.006>.
10. Research of thermal and hydrodynamic flows of heat exchangers for different air cooling systems in poultry houses / V. Trokhaniak та ін. *Machinery & Energetics*. 2023. Т. 14, № 1. С. 68-78. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2023.68>.
11. Usage of CFD for research on lateral ventilation system in poultry house / V. Trokhaniak та ін. *Engineering for Rural Development*. 2023. Т. 22. С. 582-587. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF120>.

V. Trokhaniak¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-8084-1568

T. Furkalo¹, master student, ORCID 0009-0004-4866-695X

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

INVESTIGATION OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN A COOLING SYSTEM IN A POULTRY HOUSE WITH SIDE VENTILATION

A new method of cooling the outside air in the ventilation systems of poultry houses is proposed, based on the use of water from underground wells and heat exchangers for cooling the supply air.

Numerical modeling of aerodynamics and heat transfer processes in poultry houses with a tunnel ventilation system was carried out. As a result of numerical calculations, the distribution of temperatures, velocities, and pressures in the air environment of the poultry house was obtained. The use of heat exchangers to cool the supply air makes it possible to maintain its temperature at +20-25 °C and reduce the moisture content in poultry houses, which is high when using cassette methods or spraying water with nozzles to cool the supply air.

As a result of the numerical studies, it is recommended to increase air flow rates by including a third exhaust fan located on the top line of the rear end wall. This will allow for a more even temperature distribution in the house.

Keywords: CFD, side ventilation system, cooling system, poultry house, heat exchanger

References

1. Hoff S. J. (2018). HVAC System. London : “Intech Open Limited”, 2018. 170 p.
2. Liang Y., Tabler G. T., Dridi S. Sprinkler technology improves broiler production sustainability: from stress alleviation to water usage conservation: A mini review. *Front Veterinary Sci*, 2020. Vol. 7. P. 689.
3. Investigating applicability of evaporative cooling systems for thermal comfort of poultry birds in Pakistan / H. M. U. Raza та ін. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 13. 4445. <https://doi.org/10.3390/app10134445>.
4. The effect of heat stress on ovarian function of laying hens / I. Rozenboim та ін. *Poultry Science*, 2007. Vol. 86, № 8. P. 1760-1765. <https://doi.org/10.1093/ps/86.8.1760>.
5. Kristensen H. H., Wathes, C. M. Ammonia and poultry welfare : a review. *World's Poultry Science Journal*. 2000. Vol. 56, no. 3. P. 235–245. <https://doi.org/10.1079/WPS20000018>.
6. James O. Donald. Technology of microclimate of broiler house. *Aviagen Brands*. Huntsville, USA. 2012.
7. Czarick, M., Fairchild. B. Plastic cooling pads are found to be less efficient comparing to paper cool pads, Poultry Housing Tips. *College of Agricultural and Environmental Sciences*. 2014. Vol. 24, no. 8. P. 64–69.
8. New control strategy against temperature sudden-drop in the initial stage of pad cooling process in poultry houses / X. Hui та ін. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018. Vol. 11, no. 1. P. 66–73. <https://doi.org/10.25165/ijabe.20181101.2479>.
9. 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers / K. Kim та ін. *Biosystems Engineering*. 2008. Vol. 100, no. 2. P. 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.03.006>.
10. Research of thermal and hydrodynamic flows of heat exchangers for different air cooling systems in poultry houses / V. Trokhaniak та ін. *Machinery & Energetics*. 2023. Vol. 14, no. 1. P. 68-78. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2023.68>.
11. Usage of CFD for research on lateral ventilation system in poultry house / V. Trokhaniak та ін. *Engineering for Rural Development*. 2023. Vol. 22. P. 582-587. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF120>.

Надійшла: 19.08.2024

Received: 19.08.2024

ВПЛИВ ОПОРУ РЕЗИСТОРА ЗАЗЕМЛЕННЯ НЕЙТРАЛІ НА РЕЖИМИ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬНИХ НАПРУГОЮ 20 КВ

У статті розглянуто вплив різних режимів заземлення нейтралі на експлуатаційні параметри розподільних мереж напругою 20 кВ, зокрема вибір оптимального опору резистора для резистивного заземлення нейтралі. Одним із основних завдань є підвищення ефективності роботи розподільних мереж ОЕС України шляхом переходу з напруги 10 кВ на 20 кВ. Це рішення спрямоване на зниження втрат потужності, збільшення обсягу переданої енергії та поліпшення роботи релейного захисту. У контексті такого переходу особливо актуальним є вибір способу заземлення нейтралі трансформатора живлення, що істотно впливає на надійність і безпеку експлуатації електричних мереж.

В дослідженні виконано аналіз впливу резистивного заземлення нейтралі трансформатора на режимні ха-рактеристики мережі напругою 20 кВ, а також визначення оптимального значення опору резистора. Наведено результати порівняння енерговузла мережі з ізольованою нейтраллю та резистивним заземленням. Проаналізовано основні експлуатаційні параметри, такі як струми короткого замикання, перенапруги на неушкоджених фазах, втрати потужності та роботу релейного захисту, що мають значний вплив на стабільність і безпеку функціонування мережі.

Створено імітаційну розрахункову модель енерговузла мережі на базі двотрансформаторної підстанції 110/20 кВ, що включає дві секції з відхідними лініями різної довжини та навантаження. Моделювання виконано за допомогою програмного комплексу PowerFactory, який забезпечує можливість точного відтворення реальних умов функціонування електричних систем. Особлива увага приділялася вибору опору резистора для заземлення нейтралі та його впливу на параметри мережі. У дослідженні були розглянуті чотири варіанти функціонування нейтралі: ізольована нейтраль та резистивне заземлення з опором 10 Ом, 15 Ом і 20 Ом.

Установлено, що для забезпечення стабільної та безпечної роботи розподільної мережі важливим є правильний вибір методу заземлення нейтралі. Оптимальним варіантом з переліку прийнятих значень опору є резистивне заземлення з опором 15 Ом, яке дозволяє знизити втрати потужності, забезпечує достатній рівень струмів для ефективної роботи релейного захисту та мінімізує ризики перенапруг на неушкоджених фазах. Це дослідження є важливим для підвищення надійності функціонування розподільних мереж та безпеки електропо-стачання, особливо у контексті модернізації мереж ОЕС України.

Ключові слова: напруга 20 кВ, резистивне заземлення, ізольована нейтраль, коротке замикання, перенапруги, втрати потужності, розподільні мережі.

Вступ

З метою підвищення ефективності функціонування розподільних мереж ОЕС України важливим та доцільним як зі сторони зменшення втрат потужності, збільшення потужності, що передається, так і з сторони функціонування релейного захисту є перехід з напруги 10 кВ на 20 кВ. У цьому процесі постає актуальне питання вибору способу заземлення нейтралі трансформатора, що живить мережу з напругою 20 кВ.

Спосіб заземлення нейтралі трансформатора живлення в розподільних мережах є надзвичайно важливою характеристикою. Він впливає на такі аспекти, як струм у місці пошкодження, перенапругу на неушкоджених фазах під час однофазного замикання, схему побудови релейного захисту від замикань на землю, рівень ізоляції електроустановки, вибір апаратів для захисту від грозових і комутаційних перенапруг (обмежувачів перенапруги), безперебійність електропостачання, допустимий опір контуру заземлення підстанції, а також рівень безпеки персоналу та обладнання під час однофазних замикань. Спосіб заземлення нейтралі може суттєво впливати на наведені характеристики, що ставить актуальним питання оптимального його вибору з урахуванням специфіки мережі [1-6].

Мета роботи – аналіз впливу резистивного способу заземлення нейтралі трансформатора живлення на режимні параметри, а також вибору значення опору резистора в розподільних мережах 20кВ.

Порівняння режимів роботи мережі з ізольованою та резистивно заземленою нейтраллю широко висвітлюється в наукових публікаціях [7], [8], оскільки ці два методи заземлення суттєво впливають на режимні характеристики електричних мереж і, відповідно, мають свої переваги та недоліки. Вибір між цими режимами залежить від специфічних вимог до безпеки, стабільності, економічної доцільності та

експлуатаційних характеристик мережі. У таблиці узагальнено порівняння впливу ізольованої та резистивно заземленої нейтралі характеристики мережі [9].

Аналіз наведених особливостей функціонування мереж в режимі ізольованої та резистивно заземленої нейтралі дав змогу оцінити їхні впливи на роботу електричних мереж і обрати найбільш відповідний метод функціонування нейтралі для конкретних умов

Таблиця 1 – Порівняння характеристик ізольованої та резистивно заземленої нейтралі

Характеристика	Ізольована нейтраль	Резистивно заземлена нейтраль
1. Рівень струму замикання на землю	Струм КЗ на землю є дуже низьким, оскільки мережа не має прямого шляху до землі. Це дозволяє продовжувати функціонування мережі навіть у разі однофазного замикання, що підвищує безперервність електропостачання	Струм КЗ обмежується за допомогою резистора. Це зменшує можливі пошкодження обладнання, але струм достатньо високий для того, щоб викликати спрацювання захисту і виконати відключення при замиканні
2. Перенапруги на неушкоджених фазах	Через незначний ємнісний струм замикання можуть виникати значні перенапруги на неушкоджених фазах, що може призвести до пошкодження ізоляції і викликати вторинні замикання	Обмежений на певному рівні струм КЗ забезпечує зменшення рівня перенапруги на неушкоджених фазах, що знижує ризик додаткових пошкоджень
3. Безпека та надійність	Однофазні КЗ не потребують негайного відключення, що підвищує надійність мережі. Однак, виявлення місця замикання ускладнюється, а високі перенапруги створюють ризики для безпеки	Підвищується безпека та захист персоналу. Знижується ризик ураження електричним струмом під час замикань. Спрощується виявлення місця КЗ, що покращує надійність мережі
4. Складність та витрати на впровадження	Простий у впровадженні метод, не потребує додаткових пристроїв для заземлення, що може знизити початкові витрати	Необхідність встановлення додаткових резисторів і пристроїв контролю, що збільшує початкову вартість та викликає необхідність додаткового обслуговування резисторів

Ізольована нейтраль надає перевагу у вигляді підвищеної безперервності, але за рахунок безпеки та ризику значної перенапруги. Резистивне заземлення, навпаки, забезпечує кращий захист від пошкоджень і безпеку, але вимагає відключення мережі при однофазних коротких замиканнях, також постає питання вибору оптимального значення опору резистора.

У рамках даного дослідження була створена математична імітаційна модель енерговузла розподільної мережі 20 кВ (рис.1) для аналізу впливу різних способів заземлення нейтралі на експлуатаційні режимні параметри мережі, зокрема на струми замикань, перенапруги та втрати потужності.

Моделювання було виконано в програмному комплексі PowerFactory, який широко застосовується для дослідження електричних систем завдяки його можливостям точної імітації поведінки електромереж в реальних умовах. Вибір PowerFactory як платформи для моделювання обумовлений її здатністю враховувати такі аспекти, як параметри ліній, навантаження, режими роботи та характеристики релейного захисту, що дозволяє провести глибокий аналіз впливу різних способів заземлення на мережу.

Модель відображає роботу двотрансформаторної підстанції 110/20 кВ із двома секціями напруги 20 кВ: перша секція містить три відхідні лінії (фідери) 20 кВ; друга секція – п'ять відхідних ліній 20 кВ. Лінії мають як повітряні, так і кабельні ділянки різної довжини і навантаженості (рис.2).

У моделі PowerFactory були використані реальні параметри ліній, навантаження та конфігурації підстанції для точного відтворення умов роботи мережі (рис.3). Особливий акцент було зроблено на зміні значення опору заземлення нейтралі вторинних обмоток трансформаторів живлення для оцінки впливу на струми замикання, перенапруги та втрати потужності (рис.4).

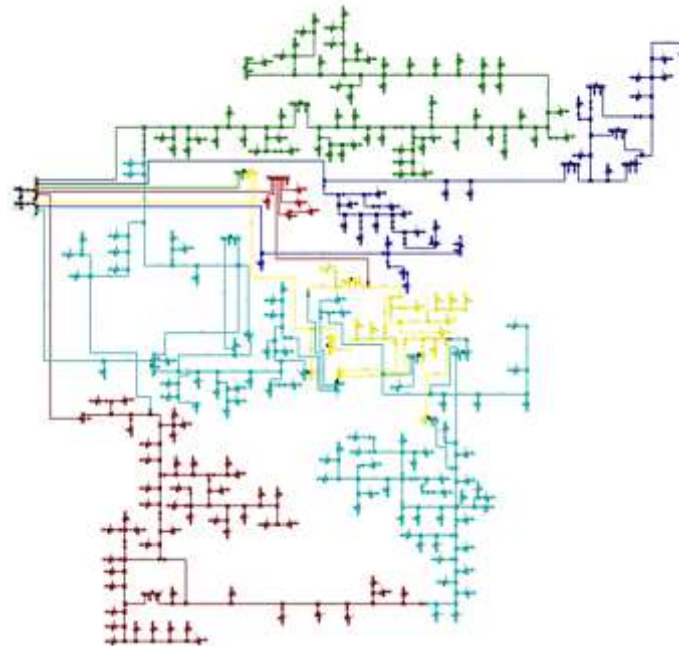


Рисунок 1 – Розрахункова імітаційна модель вісьмифідерної розподільної мережі 20 кВ в програмному середовищі Power Factory

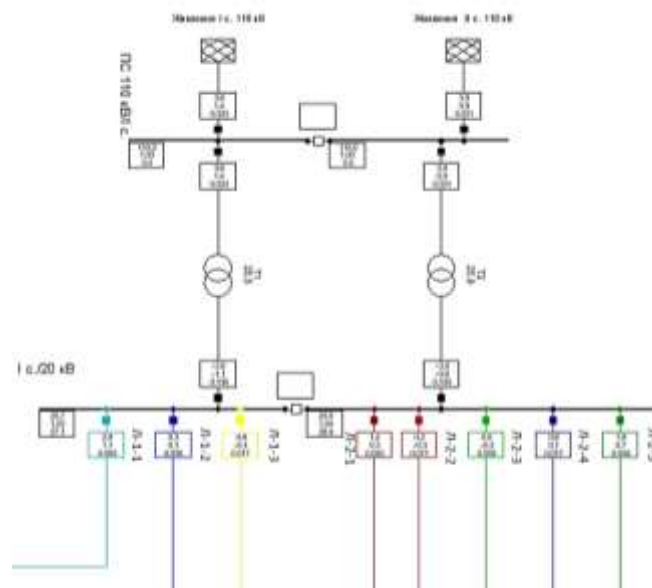


Рисунок 2 – Модель розрахункової схеми підстанції ПС 110/20 кВ

При проведенні дослідження в програмному комплексі PowerFactory одним з ключових етапів моделювання було визначення впливу кожного з методів заземлення на параметри мережі під час коротких замикань. Для цього на однакових місцях у моделі мережі були задані точки короткого замикання для кожного режиму функціонування нейтралі та, зокрема, різних значень опору заземлення нейтралі. Це дозволило провести порівняльний аналіз параметрів мережі, таких як струми замикання, перенапруги та робота релейного захисту, в однакових умовах.

Вплив способу заземлення нейтралі на результати моделювання розподільної мережі 20 кВ досліджений на однаковій точці короткого замикання у кількох аспектах, зокрема: падіння напруги, втрати потужності, рівень струмів короткого замикання, перенапруги на неушкоджених фазах та робота релейного захисту. Детальний аналіз кожного способу заземлення в контексті цих параметрів дозволив зробити висновки щодо їхнього впливу на роботу розподільної електромережі. Аналіз проводився для точки на ділянці Л-30 Зазим'я (ТП-669 – ТП-933), що дозволило здійснити порівняння впливу кожного типу заземлення.

3. Резистивне заземлення з опором 15 Ом.

Усталене значення замикання струму однофазного замикання на землю не перевищує 317 А. При збільшенні опору до 15 Ом, струм короткого замикання зменшується порівняно з 10 Ом, що знижує ризик пошкодження обладнання.

Втрати потужності складають: $\Delta S = 3,7$ МВА. Втрати потужності при цьому варіанті заземлення залишаються на помірному рівні, оскільки струми замикання все ще достатньо високі, але менші, ніж при опорі 10 Ом. Зниження втрат потужності робить цей варіант більш оптимальним для мереж із великим навантаженням, де важлива ефективність.

Переваги та недоліки: Оптимальний баланс між втратами, рівнем струму та стабільністю роботи мережі. Такий варіант підходить для мереж, що потребують надійного захисту та високої енергоефективності.

4. Резистивне заземлення з опором 20 Ом.

Усталене значення замикання струму однофазного замикання на землю не перевищує 298 А. Це найнижчий рівень струму короткого замикання серед розглянутих варіантів, що мінімізує ризик перегріву та пошкодження обладнання. Однак зниження рівня струму замикання може викликати ускладнення для налаштування релейного захисту, оскільки вимагає більш високої чутливості для виявлення замикань.

Втрати потужності складають: $\Delta S = 3,4$ МВА. Невеликі втрати потужності вказують на високу енергоефективність.

Найбільш енергоощадний варіант заземлення, що забезпечує стабільність мережі та знижує перенапруги. Проте, через низький струм короткого замикання, можливі ускладнення у точності виявлення аварійних точок, що потребує налаштування чутливішого релейного захисту.

Висновок

Вибір режиму роботи нейтралі та значення опору за резистивного заземлення нейтралі суттєво впливає на основні експлуатаційні параметри мережі під час коротких замикань. Режим ізольованої нейтралі демонструє найвище амплітудне значення струму короткого замикання фази на землю, що ускладнює роботу релейного захисту та підвищує ризик пошкодження обладнання. Виникають перенапруги на неушкоджених фазах під час однофазних замикань створює додаткові ризики для стабільності мережі та безпеки обладнання.

Резистивне заземлення забезпечує кращий баланс між струмом короткого замикання та захистом від пере-напруг. При опорі 10 Ом струм короткого замикання достатній для надійної роботи релейного захисту, що дозволяє швидко виявляти і відключати пошкоджені ділянки мережі. Однак збільшені втрати потужності можуть викликати перегрів і додаткове навантаження на обладнання.

Установлено, що зі збільшенням опору в нейтралі трансформатора енерговузла спостерігається подальше зниження струму короткого замикання до значень 317 А та 298 А відповідно, а також помірне зменшення втрат потужності ($\Delta S = 3,7$ МВА для 15 Ом і $\Delta S = 3,4$ МВА для 20 Ом). Це знижує навантаження на обладнання та підвищує енергоефективність мережі, але потребує точного налаштування релейного захисту для забезпечення швидкої реакції.

Таким чином, для підвищення надійності та безпеки функціонування мережі необхідно обирати метод заземлення з урахуванням балансу між зниженням струмів короткого замикання, рівнем перенапруг та ефективністю релейного захисту.

Вибір резистивного заземлення з відповідним значенням опору дозволяє мінімізувати ризики пошкодження обладнання та забезпечити стабільну роботу мережі.

При виборі режиму функціонування нейтралі та значення опору резистора заземлення необхідно враховувати і питомий електричний опір ґрунту.

V. Kyryk¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-0419-8934

A. Buryak, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-7732-575X

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

THE INFLUENCE OF THE RESISTANCE OF THE NEUTRAL GROUNDING RESISTOR ON THE 20 KV VOLTAGE DISTRIBUTION MODES OF OPERATION

The article examines the impact of different modes of neutral grounding on the operating parameters of 20 kV distribution networks, in The article examines the influence of different neutral grounding modes on the

operational parameters of 20 kV distribution networks, in particular, the selection of the optimal resistor resistance for resistive neutral grounding. One of the main tasks is to increase the efficiency of distribution networks of UES of Ukraine by switching from 10 kV to 20 kV. This solution is aimed at reducing power losses, increasing the amount of transmitted energy and improving the operation of relay protection. In the context of such a transition, the choice of the method of grounding the neutral of the power transformer is particularly relevant, which significantly affects the reliability and safety of operation of electrical networks.

In the study, an analysis of the effect of resistive grounding of the neutral of the transformer on the operating characteristics of the 20 kV network was performed, as well as the determination of the optimal value of the resistance of the resistor. The results of the comparison of the power node of the network with isolated neutral and resistive grounding are given. The main operating parameters, such as short-circuit currents, overvoltages on undamaged phases, power losses and operation of relay protection, which have a significant impact on the stability and safety of network operation, were analyzed.

A simulated calculation model of the network's power node based on a two-transformer 110/20 kV substation was created, including two sections with outgoing lines of different lengths and loads. Modeling is performed using the PowerFactory software complex, which provides the ability to accurately reproduce the real operating conditions of electrical systems. Special attention was paid to the selection of the resistance of the neutral grounding resistor and its influence on network parameters. In the study, four variants of the operation of the neutral were considered: isolated neutral and resistive grounding with a resistance of 10 Ohms, 15 Ohms and 20 Ohms.

It was established that in order to ensure stable and safe operation of the distribution network, it is important to correctly choose the neutral grounding method. The best option from the list of accepted resistance values is non-resistive grounding with a resistance of 15 Ohms, which allows you to reduce power losses, provides a sufficient level of currents for the effective operation of relay protection, and minimizes the risks of overvoltages on undamaged phases. This study is important for increasing the reliability of the operation of distribution networks and the security of electricity supply, especially in the context of the modernization of Ukraine's UES networks.

Keywords: voltage 20 kV, resistive grounding, isolated neutral, short circuit, overvoltage, power losses, distribution networks.

References

1. Methodical recommendations for grounding the neutral of electric networks 6–35 kV through a resistor / V. Gazhaman et al.; development A. Kvitsinsky; executed V. Santotskyi. - K.: Ministry of Energy and Coal, 2018. - 87
2. Analysis of the effectiveness of the existing neutral modes of 6–35 kV networks in power engineering / B. S. Stogniy, V. V. Maslyanyk, V. V. Nazarov [and others] // Technical electrodynamics. – 2002. – No. 3. – P. 37–41.
3. IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991) IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems <https://standards.ieee.org/ieee/142/3548/>
4. Rules for arranging electrical installations. The publication is official. Ministry of Energy and Coal of Ukraine. Kharkiv: "Fort" Publishing House, 2017. 760 p.
5. V. V. Kyryk, B. V. Tsyganenko, and O. S. Yandulskyi, 20 kV electrical distribution networks and their efficiency, monograph, Kyiv, Ukraine: "KPI named after Igor Cikorskyi", 2018, 233 p.
6. Kyryk V.V., Buryak A.R., Iskova M.S. Determination of the optimal resistance value of the neutral grounding resistor in 20 kV networks. Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute 2021. Vol. 158, No. 5. P. 96–102. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-96-102>
7. Kyryk V.V., Buryak A.R. Neutral grounding resistors in distribution electric networks. Scientific discussion Journal. 2023. No. 81. P. 21–26. URL: <https://scientific-discussion.com/wp-content/uploads/2023/10/Scientific-discussion-No-81-2023.pdf>.
8. Mitolo M., Tartaglia M., Zizzo G. Electrical Safety of Resonant Grounding. 2019 IEEE/IAS 55th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), Calgary, AB, Canada, 5–8 May 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/icps.2019.8733369>.
9. Zhou Y. Research on Neutral Voltage Offset and Its Influencing Factors of 20kV Small Resistance Grounding System. 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, 6–10 September 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/ichve49031.2020.9279425>

Надійшла: 14.10.2024

Received: 14.10.2024

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА У СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ

Стаття містить детальний аналіз вентильних двигунів (ВД) в контексті автоматизованого управління, розглядаються динамічні режими та математичне моделювання електроприводу. Вона охоплює питання динамічних характеристик, побудови передаточних функцій, а також особливостей роботи ВД у системах з керованою швидкістю обертання. У статті подано експериментальні дані та результати комп'ютерного моделювання, які підтверджують ефективність вибраних моделей.

Експериментальні дослідження, проведені на лабораторному макеті, підтверджують точність розробленої математичної моделі, зокрема можливість апроксимації передатної функції двигуна в лінійному вигляді для спрощення аналізу та налаштування системи керування. Комп'ютерне моделювання діє в середовищі MATLAB з використанням SIMULINK, що дозволяє з високою точністю та наочністю візуалізувати перехідні процеси у ВД. Представлено також принцип підлеглого регулювання у замкнутій системі керування, який забезпечує стабільність і точність керування шляхом розділення на контури швидкості та струму.

Результати моделювання демонструють можливість використання отриманих моделей для подальших досліджень та розробки ефективних і надійних систем керування вентильними двигунами в промислових умовах. Запропонований підхід до моделювання відкриває перспективи для створення енергоефективних електроприводів з високою точністю регулювання.

Ключові слова: вентильний двигун, математичне моделювання, автоматичне керування, передатна функція, динамічні режими, комп'ютерне моделювання, MATLAB, SIMULINK, промисловий електропривод.

Регульований електропривод зазвичай виступає як виконавчий пристрій у замкнутій системі автоматичного керування (САК). Однак недостатнє дослідження динамічних характеристик вентильного двигуна (ВД) та відсутність точної передатної функції значно ускладнюють процес синтезу САК з використанням цього приводу.

ВД представляє собою електромеханічну систему, що складається з силового напівпровідникового перетворювача, блоків керування та датчиків. Для дослідження динамічних режимів роботи приводу була розроблена математична модель, яка базується на системі нелінійних диференціальних рівнянь, що описують роботу синхронної машини (СМ). [2, 3, 4]:

$$\frac{d\psi_k}{dt} = U_k - i_k r_k, \quad k = 1 \dots 5, \quad (1)$$

рівняння руху

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c), \quad (2)$$

і рівнянь зворотного зв'язку по положенню ротора, що враховують закон керування комутатором і кутові характеристики ВД:

$$\left. \begin{array}{l} \text{- для закону} \\ \beta_0 = \text{const} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \omega_i = \omega \\ \omega_0 = \omega_i + \frac{d\theta}{dt} \\ \omega_0 = \omega + \frac{d\theta}{dt} \\ \gamma = \arccos \left(\cos \delta - \frac{2I_d X_k}{\sqrt{3} X_{ad} i_f} \right) \end{array} \right\} (3)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{- для} \\ \text{закону} \\ \beta = \text{const} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \omega_i = \omega_c \\ \omega_i = \omega + \frac{d\theta}{dt} \\ \omega_0 = \omega + \frac{d\theta}{dt} \\ \gamma = \arccos \left(\frac{2I_d X_k}{\sqrt{3} X_{ad} i_f} + \cos \beta \right) \end{array} \right\} (4)$$

$$\theta = \arctg \left(\frac{\frac{d\psi_d}{dt} + i_d r - \psi_q \omega_p}{\frac{d\psi_d}{dt} + i_q r + \psi_d \omega_p} \right) - \frac{d\theta}{dt} t \quad (5)$$

де ψ_k, i_k, r_k - потокозчеплення, струми і активні опори окремих контурів; J, M - момент інерції і електромагнітний момент ВД; $\omega_i, \omega_0, \omega$ - частоти струму, поля статора і обертання ротора; θ - кут навантаження синхронної машини; γ, δ - кути комутації і запасу перетворювача; β_0, β - кути між струмом і відповідно ЕДС холостого ходу і напругою машини;

$$\beta_0 = \beta + \theta; \quad \beta = \gamma + \delta;$$

ψ_d, ψ_q, i_d, i_q - потокозчеплення і струми по осям d і q ; r - активний опір обмотки статора СМ; X_k - комутаційний реактанс перетворювального кола;

X_{ad} - взаємодуктивність по подовжній осі; I_d - середнє значення випрямленого струму.

Аналіз рівнянь показує, що при законі $\beta = \text{const} = 0$ вентильний комутатор генерує поле реакції якоря, частота якого синхронно пов'язана з частотою обертання ротора. Це усуває коливальні властивості, характерні для машин змінного струму. Проте при $\beta = \text{const}$, частота струму обмоток статора змінюється відповідно до частоти обертання ротора, що може викликати коливання. Для підтвердження точності результатів, отриманих цифровим моделюванням, було проведено експериментальні дослідження перехідних процесів на макеті СМ типу ЕСС-52-4, що дозволило встановити діапазони для приведення ВД до лінійної моделі.

$$i_f \geq 0.8i_{fn} \quad \text{і} \quad 20^0 \leq \beta \leq 60^0 \quad (6)$$

ВД можна виконати лінійним об'єктом. За вказаних умов складна система нелінійних рівнянь (1) - (5) приводиться до достатньо простої лінійної передатної функції, для чого необхідно апроксимувати розрахункові криві перехідного процесу лінійними диференціальними рівняннями необхідного порядку. Отримана в результаті реальної апроксимації передатна функція ВД з коефіцієнтами в чисельному вигляді враховуватиме весь набір початкових параметрів і залежності системи без додаткових допущень, що приводять до суттєвої відмінності від реального об'єкту:

$$W(p) = \frac{K_d}{ap^2 + bp + c}, \quad (7)$$

де a, b, K_d - коефіцієнти передавальної функції ВД.

Якщо ввести позначення:

$$\left. \begin{aligned} T_M = b; T_e = \frac{a}{b} \\ C_e = \frac{1}{K_d \cos \beta}; C_m = \frac{\sqrt{3}U_{1n}}{III_H} 3_H \\ R_e = \frac{T_M C_e C_m \cos^2 \beta}{J}; L_e = R_e T_e \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

то можна отримати передавальні функції ВД у вигляді послідовно включених аперіодичної і інтегруючої ланок із зовнішнім негативним зворотним зв'язком:

- за регулюючою дією:

$$\left. \begin{aligned} W(p) = \frac{\omega_p(p)}{U(p)} = \frac{\frac{1}{C_e \cos \beta}}{T_M T_e p^2 + T_M p + 1} \\ W'(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{\frac{J}{C_e C_m \cos^2 \beta}}{T_M T_e p^2 + T_M p + 1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де T_M, T_e - еквівалентні електромеханічна і електромагнітна постійні часу ВД; C_m, C_e - еквівалентні конструктивні постійні; L_e — еквівалентний індуктивний опір перетворюючого ланцюга; η_n — номінальний КПД (визначається величиною кута випередження відповідно до закону керування).

Показаним передатним функціям відповідає структурна схема вентильного двигуна (рис.1) і наступні рівняння (перетворювач представлений аперіодичною ланкою 1-го порядку):

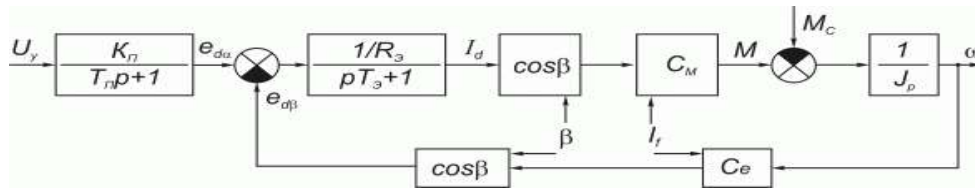


Рисунок 1 - Структурна схема ВД

$$\left. \begin{aligned}
 e_{d\alpha} &= e_{d\beta} + i_d R_e + L_e \frac{di_d}{dt} \\
 M &= M_c + J \frac{d\omega}{dt} \\
 M &= C_M I_d \cos \beta \\
 e_{d\alpha} &= e_{d0} \cos \alpha \\
 e_{d\beta} &= C_e \omega \cos \beta \\
 T_n \frac{e_{d\alpha}}{dt} + e_{d\alpha} &= K_n U_y
 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де $e_{d\alpha}, e_{d\beta}$ - середні значення ЕДС випрямляча і інвертування; K_n - коефіцієнт передачі перетворювача; T_n - електромагнітна постійна часу перетворювача; U_y - напруга управління перетворювача.

Зацікавленість викликає залежність постійних часу ВД від кута випередження, які для експериментальної машини зображені на рис.2. Орієнтовний розрахунок для ряду синхронних машин (500-5000 кВт, 500-3000 об/хв) показав, що величини еквівалентних постійних часу при нульовому куті випередження лежать в межах $T_e=0,015...0,09$ с і $T_m=0,3...0,9$ с.

Принципова відмінність вентильного двигуна від звичайних синхронних машин, які живляться синусоїдальною напругою від мережі змінного струму, полягає в несинусоїдальній кривій напруги на обмотках і в дискретному характері переміщення МРС і магнітного поля. Це може приводити до нестійкої роботи системи в динамічних режимах і пульсацій моменту і частоти обертання в сталому режимі. Оскільки в кожній фазі машини у вентильному двигуні за один оборот валу струм протікає протягом $2\left(\frac{2}{3}\pi + \gamma\right)$, то обмотки статора використовуються гірше, ніж у звичайному двигуні. Потужність

синхронної машини у ВД в порівнянні з потужністю при синусоїдальному живленні визначається коефіцієнтом габаритної потужності C_g . Залежність коефіцієнта габаритної потужності від кутових параметрів вентильного двигуна і законів управління представлена на рис.3.

Максимум функції $C_g = f(\beta, \gamma)$ визначає розрахункову потужність машини. Так для способу управління $\beta = 60^\circ$ (крива 2) і $\beta_{\min} = f(\gamma)$ (крива 1) при номінальному куті комутації $\gamma_H = 20^\circ$ відповідно маємо 2 і 1,4. Розрахункова потужність двигуна в схемі ВД збільшується:

$$P_{ВД} = P C_{g \max}, \quad (12)$$

де P — розрахункова потужність, яка визначається по діаграмам навантажень.

Номінальний струм двигуна визначається по формулам:

$$\begin{aligned}
 \text{для способу керування } \beta = const \quad I_H &= \frac{P_H}{\sqrt{3} U_H \cos\left(\beta - \frac{\gamma_H}{2}\right)} & (13) \quad \text{для способу керування } \beta_{\min} = f(\gamma) \quad I_H &= \frac{P_H}{\sqrt{3} U_H \cos\left(\delta_{\min} + \frac{\gamma_H}{2}\right)} & (14)
 \end{aligned}$$

де $\delta_{\min} \approx 5...10^\circ$ - мінімальне значення кута запасу.

Залежність коефіцієнтів зсуву $K_C = \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right)$ і $K_c = \cos\left(\delta_{\min} + \frac{\gamma}{2}\right)$ від кутових параметрів і способів керування показані на рис. 4.

Для мостових трифазних схем максимальна величина середнього значення випрямленої напруги U_{d0} , номінальна лінійна напруга двигуна U_H і лінійна напруга мережі U_c зв'язані наступним чином:

$$\frac{U_{d0}}{U_H} = \frac{U_{d0}}{U_c} = 1,35. \quad (15)$$

Число послідовно з'єднаних вентилів в плече моста перетворювача

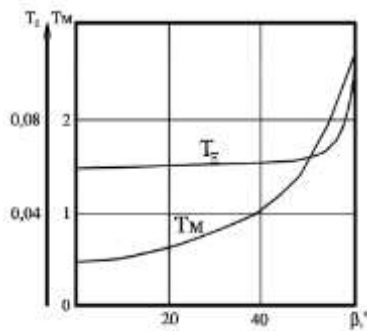


Рисунок 2 - Залежність постійних часу ВД від кута випередження

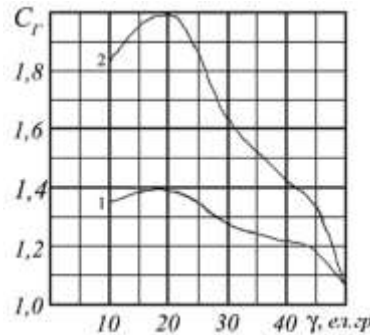


Рисунок 3 - Залежність коефіцієнта габаритної потужності

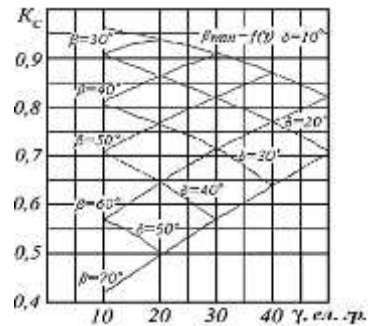


Рисунок 4 - Залежність коефіцієнтів зсуву

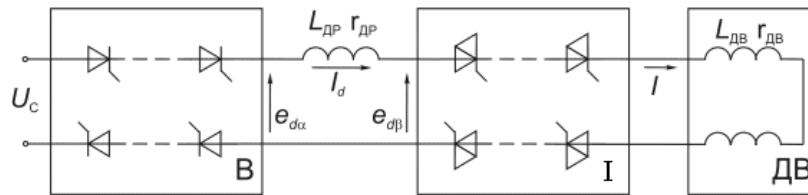


Рисунок 5 - Схема заміщення ВД

$$N \geq \frac{U_{d0}}{U_B} \cdot K_U, \quad (16)$$

де U_B — допустима напруга на вентилях; $K_U = 1,5 \dots 2$ - коефіцієнт запасу по напрузі.
Число паралельних гілок:

$$M \geq \frac{I_d}{3I_{dT}} \cdot K_I, \quad (17)$$

де $I_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_H$ величина середнього значення струму на вході інвертору, відповідна номінальному струму двигуна; I_{dT} — середнє значення струму тиристора; $K_I = 2 \dots 3$ - коефіцієнт запасу по струму.

Для згладжування пульсацій випрямленого струму і обмеження швидкості наростання струму в ланцюзі двигуна при аварійних режимах роботи перетворювача використовують згладжуючий дросель, який вибирається по струму I_d і індуктивності L_{dp} . Індуктивність дроселя визначається з умови:

$$L_{dp} \geq 0.15L_K, \quad (18)$$

де $L_K = (0,15 \dots 0,35) \frac{U_H}{I_H p \omega_H}$; $p = \frac{60f}{n_H}$ - число пар полюсів двигуна.

Активний опір дроселю визначають за втратами ΔP_{dp} і струму I_d :

$$r_{dp} = \frac{\Delta P_{dp}}{I_d^2} \quad (19)$$

Еквівалентний опір перетвореного ланцюга знаходять зі схеми заміщення, показаної на рис. 5.
Еквівалентний опір перетвореного ланцюга:

$$R_e = r + r_{dp} + 4Nr_B + r_\gamma, \quad (20)$$

Опір обмоток двигуна орієнтовно можна визначити по формулі:

$$r = (0.0002 \dots 0.02) \frac{U_H}{\sqrt{3}I_H}, \quad (21)$$

Опір вентиля у відкритому стані:

$$r_B = \frac{\Delta U_B}{I_d}, \quad (22)$$

де $\Delta U_B = (1,8 \dots 2,4) B$ — падіння напруги на вентилях у відкритому стані.

Еквівалентний опір зменшення випрямленої напруги, що враховує, в період комутації вентилів:

$$r_T = \frac{mX_T}{2p}, \quad (23)$$

Де $m=3$ — число фаз перетворювача;

$$X_T = \frac{U_{K\%}}{100\%} \cdot \frac{U_{2TH}}{I_{2TH}} - \text{індуктивний опір вторинної обмотки трансформатора};$$

U_{2TH}, I_{2TH} - номінальна напруга і струм вторинної обмотки трансформатора;

$U_{K\%} - (4,5 \dots 6)\%$ - напруга короткого замикання трансформатора.

Еквівалентна індуктивність перетворювального ланцюга:

$$L_e = L_K + L_{DP} \quad (24)$$

Коефіцієнт передачі перетворювача $K_{II} = \frac{\Delta e_d}{\Delta U_y}$ визначається із залежності $e_d = f(U_y)$, яка

приводиться в каталогах або будується (рис. 6).

Ефективно досліджувати динамічні режими замкнутих електромеханічних систем можна за допомогою універсальної інтегрованої математичної комп'ютерної системи типу MATLAB. В цій оболонці модель ВД будується на функціональних елементах з використанням пакету моделювання динамічних систем SIMULINK [5]. В комп'ютерну систему інтегровані текстові, формульні і графічні редактори, що дозволяє представляти складні моделі і процеси з виводом їх на друк.

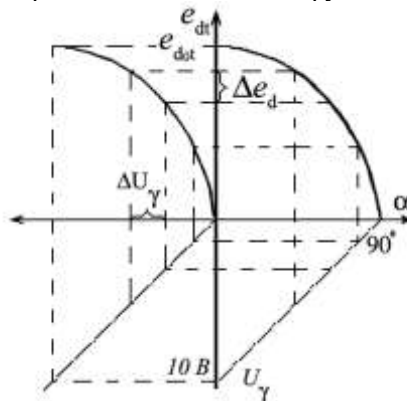


Рисунок 6 - Залежність $e_d = f(U_y)$

Управління ВД в пропонуваній моделі реалізовано за принципом підлеглого регулювання. Система розбивається, наприклад, на два контури - швидкості і струму. Кожний контур містить свій регулятор і негативний зв'язок по контрольованій змінній. На вхід системи подається сигнал із задатчика інтенсивності (ЗІ). В системі MATLAB модель ВД має вигляд (рис.7).

На рис.8 показані діаграми заданої швидкості, дійсної і моменту ВД відповідно: а) $\beta = 0^\circ$, б) $\beta = 30^\circ$, в) $\beta = 60^\circ$ при $M_C = M_H$ і $U_s = 100\%$; г) $\beta = 60^\circ$ при $M_C = M_H$ $U_s = 30\%$, отримані в результаті комп'ютерного моделювання.

Особливу цікавість представляють результати моделювання процесу реверсування частоти обертання ВД на повному ході зміною кута випередження, представлені на рис.9. Тут: а) $\beta = 70^\circ$, б) $\beta = 80^\circ$, в) $\beta = 100^\circ$, г) $\beta = 110^\circ$ при $M_C = M_H$ і $U_s = 100\%$. На рис.10 показана статична регулююча характеристика процесу реверсу, побудована за результатами моделювання.

Результати комп'ютерного моделювання ВД показали високу збіжність з експериментальними даними, отриманими на лабораторному стенді. Представлення ВД передавальною функцією є наближеною моделлю, проте відображає основні властивості таких двигунів.

Висновок. У статті досліджено особливості математичного моделювання та аналіз динамічних характеристик ВД як об'єкта автоматизованого управління. Основну увагу приділено розробці математичної моделі ВД на основі нелінійних диференціальних рівнів синхронної машини, що враховує силові напівпровідникові перетворювачі, блоки керування та датчики. Така модель дозволяє дослідити динамічні режими роботи електроприводу та передбачити поведінку двигуна за різних умов навантаження.

Аналіз характеристик ВД показав, що вибір закону впливає на частотні властивості системи, зокрема на стійкість та коливальні процеси. У статті наведено дві основні моделі керування, які різняться частотою струму в обмотках статора, яка, у свій час, може синхронно або гнучко змінюватися залежно від частоти обертання ротора. Вибір певної стратегії керування дозволяє уникнути небажаних коливань, які характерні для двигунів змінного струму.

Для підтвердження теоретичних даних було проведено експериментальні дослідження на лабораторному макеті, результати яких співпали з комп'ютерним моделюванням. Таким, було встановлено, що при певних параметрах ВД можна апроксимувати лінійну передаточну функцію, що спростує аналіз та проектування системи керування. Отримані моделі також дозволяють досліджувати ефективність ВД у різних режимах роботи, враховуючи момент пульсації та частоти обертання в сталому режимі.

Особливої уваги заслуговує підхід до комп'ютерного моделювання в MATLAB, що реалізовано за допомогою пакета SIMULINK. Використання інтегрованих текстових, графічних та формальних редакторів дозволило спростити моделювання та візуалізацію процесів, забезпечуючи наочність та точність отриманих результатів. Крім того, в моделях реалізовано принцип підлеглого регулювання, що забезпечує поділ системи на контури швидкості та струму з відповідними регуляторами та зворотними зв'язками, що забезпечує точність керування та стабільність системи.

Представлена стаття у розвиток методів керування вентильними двигунами та забезпечує основу для подальших досліджень у галузі автоматизованих електромеханічних систем. Отримані результати можуть бути застосовані для розробки енергоефективних промислових приводів, які потребують високої точності регулювання та стійкості в умовах змінного навантаження.

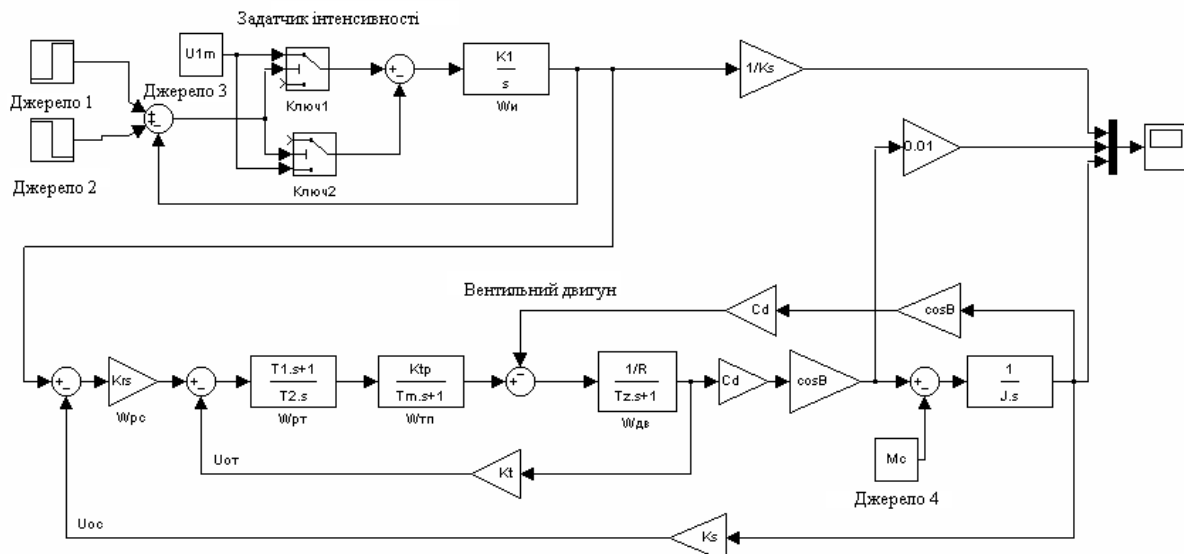


Рисунок 7 - Схема моделі ВД.

Таблиця. Позначення основних елементів схеми

Позначення	Призначення
$U_{1m} = 10; e_{\max} = \frac{(0,8...0,9)M_{\max} - M_c}{J}; J' = J + J'_{pm}$	Задатчик інтенсивності
$K_T = \frac{U_{OT \max}}{I_{\max}}; I_{\max} = \frac{M_{\max}}{C_M \cos \beta}$	Коефіцієнт передачі по струму
$K_c = \frac{U_{OC \max}}{I_{\max}}$	Коефіцієнт передачі по швидкості
$W_{PT}(p) = \frac{T_1 p + 1}{T_2}; T_1 = T_e; T_2 = \frac{a_T T_M K_{\Pi} K_T}{R_e}$	Передаточна функція регулятора струму
$W_{PC}(p) = K_{pc} = \frac{K_T J}{a_c a_T T_M C_e K_C}$	Передаточна функція регулятора швидкості
$1/K_s, 0,01$	Масштабні коефіцієнти

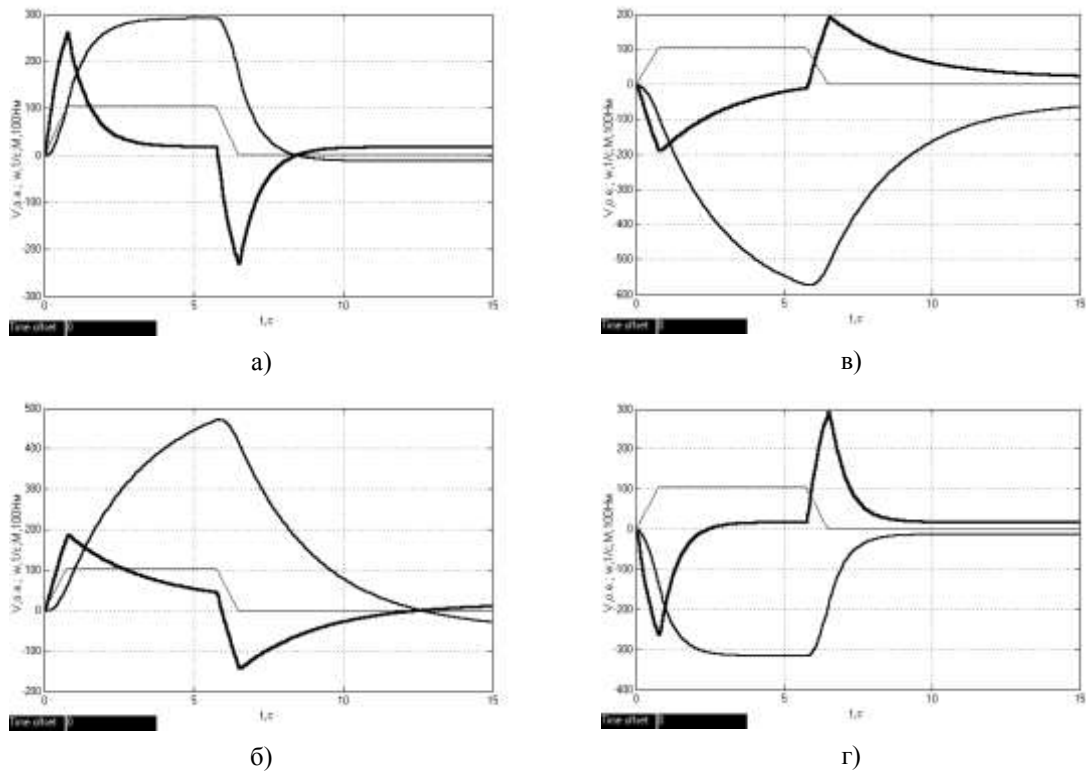


Рисунок 8 - Результати комп'ютерного моделювання режимів пуску і гальмування

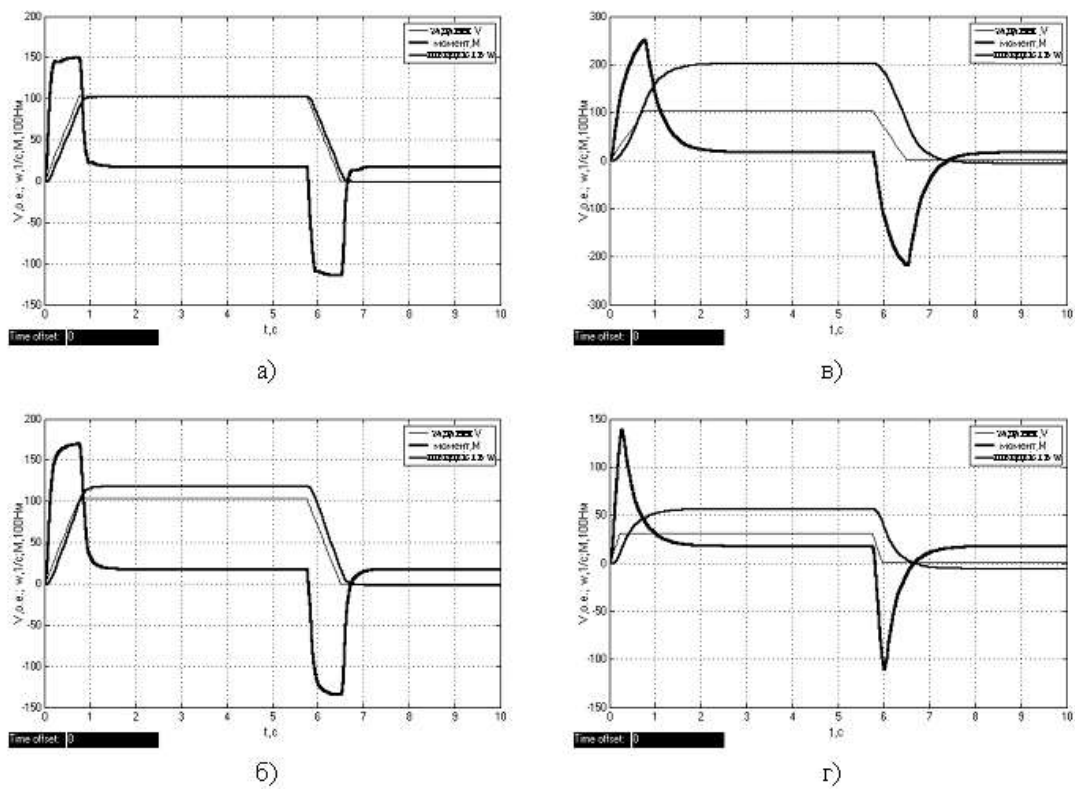


Рисунок 9 - Результати комп'ютерного моделювання режиму реверсу

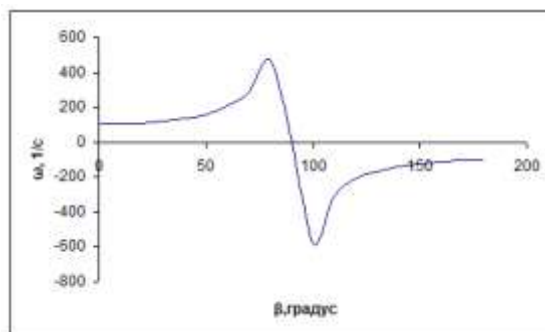


Рисунок 10 - Статична регульовальна характеристика ВД

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”

MATHEMATICAL MODELING AND ANALYSIS OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A BRUSHLESS MOTOR IN AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

The article provides a detailed analysis of brushless motors (BM) within the context of automated control, focusing on dynamic modes and mathematical modeling of the electric drive. It addresses the dynamic characteristics, transfer function development, and specific operational aspects of BM in systems with regulated rotational speed. The article presents experimental data and computer simulation results that validate the effectiveness of the selected models.

Experimental studies conducted on a laboratory model confirm the accuracy of the developed mathematical model, particularly demonstrating the feasibility of approximating the motor's transfer function in a linear form to simplify control system analysis and tuning. Computer simulations are conducted in MATLAB using SIMULINK, which enables precise and illustrative visualization of transient processes in the BM. The article also introduces a subordinate control principle within a closed-loop control system, which ensures control stability and accuracy by dividing into speed and current loops.

The simulation results demonstrate the potential of utilizing the developed models for further research and the design of efficient and reliable control systems for brushless motors in industrial settings. The proposed modeling approach paves the way for the creation of energy-efficient electric drives with high-precision control.

Keywords: brushless motor, mathematical modeling, automatic control, transfer function, dynamic modes, computer simulation, MATLAB, SIMULINK, industrial electric drive.

References

1. Zakladnyi O.M., Zakladnyi O.O. Energy-efficient electric drive with brushless electric motors. Monograph. Second edition: translated and supplemented. - Kyiv, "Libra", 2013. - 213 p.
2. Zakladnyi O.M., Zakladnyi O.O. Energy-efficient electric drive with brushless electric motors. Monograph. - Kyiv, "Libra", - 2012. - 185 p.
3. Tkachuk V.I., Bilyakovskiy I.E., Makarchuk O.V., Kasha L.V., Greschuk O.V. Theory and synthesis of DC valve motors // Lviv Polytechnic. – 2011, 288 p.
4. Zakladnyi O.M., Zakladnyi O.O. Modern methods of power quality regulation // Industrial electric power and electrical engineering (Promelectro). - 2007. - #2. - P. 25-30.
5. Modeling of electromechanical systems: Textbook / Cherny O.P., Lugovoi A.V., Rodkin D.Y., Sysyuk G.Yu., Sadovoy O.V. – Kremenichuk, 2001. – 410 p.
6. Zakladnyi O.M., Prakhovnyk A.V., Solovei O.I. Energy saving by means of industrial electric drive: Study guide. - K: Condor, 2005. - 408 p.
7. Zakladnyi O.M., Zakladnyi O.O. The influence of commutator control methods on the harmonic composition of valve motor current and voltage curves // Industrial electric power and electrical engineering (Promelectro). - 2008. - No. 1. - P. 35..40.
8. Electromechanical automatic control systems and electric drives: Education. manual / M.G. Popovych, O.Yu. Lozynskiy, V.B. Klepikov, etc.; Under the editorship M. G. Popovych, O. Yu.J. Lozynskiy. - K.: Lybid, 2005. - 680 p.
9. Mathematical modeling of electric power systems in market conditions: monograph / S.E. Saukh, A.V. Borysenko. — K.: "Three K", 2020. - 340 p.

Надійшла: 01.11.2024

Received: 01.11.2024

ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

ENERGY OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

УДК 621.311

DOI 10.20535/1813-5420.4.2024.315592

Л.Д. Третякова¹, д-р. техн. наук, професор, ORCID 0000-0001-5244-746X

В.А. Побігайло¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2673-7329

Є.Р. Усатий¹, студент

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗМІНИ В СВІТОВІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ СПРИЧИНЕНІ ВІЙНОЮ РОСІЇ ПРОТИ УКРАЇНИ

Проблематика. Російське вторгнення в Україну, відмова росії від постачання запланованих обсягів природного газу в країни Європейського Союзу спричинили світову енергетичну і фінансову кризи та загальмували рух до розвитку відновлювальної енергетики. Для багатьох країн перехід до стабільних та екологічно чистих джерел енергії став проблематичним.

Мета дослідження. Загальний огляд та аналітичний аналіз тенденцій розвитку споживання енергетичних ресурсів та впровадження відновлювальних джерел в електроенергетичних системах у 2017-2023 роках за матеріалами дослідження International Energy Agency (IEA), наведеними у World Energy Outlook (WEO) [1-6].

Методика реалізації. У статті для дослідження використано тенденції розвитку світової системи відновлювальних станцій на підставі забезпечення кліматичної нейтральності, нульових викидів та чистого екологічного середовища. Дослідження змін та способів обмеження негативних наслідків від військових дій в Європі та Близькому Сході виконано за перспективними планами IEA.

Результати дослідження. Наведено огляд зміни структури енергоресурсів у світовому енергетичному балансі. Показано, що енергетична криза призвела до різкого зростання видобутку викопного палива, передусім вугілля та нафти. З метою стабілізації цін на паливо та зниження ціни на вироблену електроенергію розпочато будівництво нових потужностей для виробництва 250 млрд. кубометрів скрапленого газу щорічно. Наведено статистичну та прогнозовану інформацію щодо структури світового балансу енергоносіїв і річного виробництва електроенергії за видами генерації. Розглянуто екологічні негативні наслідки, які зареєстровано на останні три роки: підвищена емісія CO₂; забруднення повітря дрібнодисперсним пилом; забруднення ґрунтів і водних горизонтів; зміна кліматичних показників. Проаналізовано проблеми, які утворилися для реалізації нових проєктів будівництва відновлювальних джерел, розвитку електроенергетичної інфраструктури, безпеки та надійності електропостачання. Виконано аналіз запропонованих заходів за кількома сценаріями щодо збільшення виробництва і використання сонячної, вітрової та атомної енергії, зменшення залежності від традиційних джерел енергії та перспективи досягнення нульових викидів діоксиду вуглецю до 2030 року.

Висновки. Дії, спрямовані на скорочення споживання енергії, прогнозоване зниження цін на паливо, заплановані перезапуски атомної енергетики та подальше впровадження відновлювальних станцій – такі запропоновані заходи дають змогу вирішувати світові проблеми, що виникли. Впевненість у вирішенні поставлених завдань надають підтвердження з боку 83 країн та Європейського Союзу вчасно та в повному обсязі виконати зобов'язання стосовно досягнення нульового рівня викидів діоксиду вуглецю. Вивчення досвіду та напрямів розвитку світової енергетики створить можливість до швидкого відновлення енергетичної структури в Україні в післявоєнний час.

Ключові слова: енергетична криза, екологічні наслідки, відновлювальна енергетика, викиди діоксиду вуглецю.

Світова енергетика з початку XXI сторіччя знаходиться в процесі масштабних змін, які насамперед скеровані на інтенсивне впровадження основних технологій відновлюваної енергетики в умовах відповідного зниження їх вартості та обмеження використання викопних природних копалин та нафтопродуктів. У планах розвитку (WEO-2017) [1] енергетичної галузі вперше було впроваджено новий важливий напрямом – «Сценарій сталого розвитку і нових стратегій в енергетики» з комплексним підходом щодо узгодження основних цілей світового сталого розвитку («Цілі сталого розвитку» на період

2015–2030 роки) [7] та положень «Рамковою конвенцією ООН про зміни клімату (UNFCCC)» [8] щодо запобігання змінам клімату на 2021–2030 роки. Згідно наведеного сценарію основні напрями розвитку було визначено як «подальше впровадження природного газу поряд зі стрімко зростаючою відновлювальною енергетикою та забезпечення загального доступу до недорогого, надійного, стійкого і сучасного енергопостачання в будь-якій країні світу». У вказаних документах наголошувалося, що задля створення умов стосовно обмеження зростання глобального потепління на 1,5 °C до 2050 року потрібно реалізувати щонайменше такі сфери діяльності:

1. Активізувати державну політику з виробництва енергії з альтернативних джерел. Таке положення передбачало зростання інвестицій у будівництво нових електростанцій з використання відновлювальної енергії;

2. Впровадження інноваційних технологій і палива, використання яких дає змогу зменшити викиди діоксиду вуглецю (CO₂). Потрібно передбачити будівництво потужних електростанцій із застосуванням палива з низьким рівнем викидів, насамперед АЕС, з впровадженням технологій для уловлювання CO₂ та його постійного зберігання або перетворення на кліматично нейтральне паливо.

За «Сценарієм сталого розвитку і нових стратегій» прогнозувалося, що низьковуглецеві джерела подвоють свою частку та в 2040 році досягнуть 60% в структурі електроенергетики, у кінцевому енергоспоживанні частка прямого та непрямого використання відновлювальних джерел зросте з 9% до 16% [2, 3]. Стрімке зростання використання відновлювальних джерел в електроенергетиці та вимоги Паризької угоди «наближать кінець періоду широкого використання вугілля». Споживання нафти продовжуватиме зростати до 2040 року, але вже нижчими темпами. Підвищення енергоефективності та заходи з економії знизять потребу в зростанні видобутку та виробництві енергії. Однак сценарій «сталого розвитку» на планеті закінчився 24 лютого 2024 році з початком вторгнення росії в Україну. Нині, як відзначають аналітики, світ вступив в період трансформацій на підставі тривалих військових конфліктів [9].

Вторгнення росії в Україну призвело до ескалації глобальної енергетичної та фінансової кризи, що може стати історичним поворотним моментом у політиці та енергетиці в найближчі роки. Продовжуючи бойові дії в Україні, РФ створює ризики виникнення затяжних конфліктів на Близькому Сході та Африці. Геополітична напруженість руйнує енергетичну безпеку та перспективи швидких, технологічних, безпечних і фінансово доступних процесів розвитку. Геополітика та енергетика завжди пов'язані впродовж усієї ери застосування природного і викопного палива. Імпортери є залежними від експортерів у постачанні, а експортери так само залежні у плані отримання прибутку та розвитку технологій. Історично політичні та комерційні відносини між виробниками та споживачами змінювалися, призводячи чи до погіршення, чи до врегулювання як способу управління такою залежністю. У двадцятому сторіччі такі ризики були знижені через створення відкритих міжнародних енергетичних ринків, спочатку вугілля та нафти, а останнім часом і природного газу. Добре функціонуючі ринки, поряд з такими засобами безпеки, як резервні незавантажені потужності основних виробників і координована система запасів нафти, допомогли країнам управляти змінами в попиті і пропозиції та забезпечити запаси у разі відмов, які спричинені екстремальними погодними умовами, природними надзвичайними ситуаціями чи геополітичними подіями.

Вторгнення росії в Україну стало серйозним випробуванням на стійкість сучасної енергосистеми до геополітичних потрясінь. Стрибки цін, що виникли після скорочення постачання газу з Росії, безумовно були суттєвими, але спроба росії використати природний газ як політичний важіль провалилася. У березні та квітні 2022 року International Energy Agency (IEA) оприлюднило план з десяти пунктів щодо зменшення залежності Європейського Союзу від російського природного газу та план з десяти пунктів щодо скорочення використання нафти [10, 11]. Росія втратила свого найбільшого споживача – Європейський Союз, знищила репутацію надійного експортера та створила стимули до пошуку альтернативи природному газу для споживачів. Світова енергетична криза спричинила суттєвий перегляд попиту на природний газ у бік зниження експорту російського газу. Війна в Україні призвела до обмеження закупівлі російського газу. Якщо у 2021 році планувалося щорічне використання газу до 2050 року в обсязі не менш як 1 750 млрд кубометрів, то 2023 року обсяги поставки від інших постачальників знижено до 920 млрд куб. Впровадження новітніх технологій для виробництва водню способом електролізу замість використання природного газу дає можливість до подальшого зменшення обсягів.

Аналіз інформації та прогнозів, які наведено у щорічних звітах IEA, починаючи з 2017 року і до 2023 року [1-6] дає змогу проаналізувати наскільки суттєво вплинули війна між росією та Україною, війна на Близькому сході на подальший розвиток електроенергетики, стан екологічного середовища, доступності людей до систем електропостачання та інших чинників. IEA – це недержавна самостійна міжнародна організація у складі Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). IEA утворена 1974 року з метою сприяння міжнародному співробітництву країн-імпортерів енергоресурсів в напрямках енергетичної та екологічної безпеки. Прогнози IEA базуються на ретельно перевіреній інформації із залученням провідних фахівців з енергетики. Особлива увага приділяється розвитку

раціональних енергетичних проєктів, використанню альтернативної енергетики, міжнародної кооперації в сфер новітніх технологій. Завдання впровадження відновлювальних джерел енергії позиціонуються як пріоритетні в енергетиці. У контексті вирішення окреслених проблем, останніми роками з'явилася велика кількість робіт, у яких аналізуються можливості та способи забезпечення високого рівня енергоефективності в європейських країнах [12–14] та Україні [15, 16].

Ознайомлення з прогнозами розвитку світової енергетики і вивчення рекомендацій щодо подолання наслідків світової енергетичної та фінансової кризи дасть змогу ефективно трансформувати українську енергетичну структуру та швидко відновити енергетичну безпеку у післявоєнний період.

Мета та завдання Загальний огляд та аналітичний аналіз тенденцій розвитку споживання енергетичних ресурсів та впровадження відновлювальних джерел в електроенергетичних системах з 2017 по 2023 роки за матеріалами дослідження International Energy Agency (IEA), наведеними у World Energy Outlook (WEO).

Матеріал і результати досліджень Енергетична криза призвела до уповільнення розвитку відновлювальних джерел в електроенергетиці, у деяких країнах розвиток систем електропостачання та процеси впровадження екологічно чистих способів опалення та приготування їжі загальмувалися або навіть зменшилися до докризового періоду.

Швидке, але нерівномірне відновлення світової економіки після рецесії, яка була спричинена Covid 19, та подальша енергетична криза створили великі навантаження на частину сучасної енергетичної системи, викликаючи різке зростання цін на ринках природного газу, вугілля та електроенергії. З 2020 року енергоносії подорожчали на 40 %. З 2021 року зареєстровано різкий поворот до використання вугілля та нафти. Ціни на викопне паливо досягли піків 2022 року. Захист споживачів від стрімкого зростання цін на паливо у 2022 році дорого обійшовся уряду США (900 мільярдів доларів на рік на утримання цін на електроенергію на споживчому ринку) та країнам Європейського Союзу (600 млрд євро на екстрену підтримку).

2023 року деякі з безпосередніх наслідків глобальної енергетичної кризи ослабли, але ризики на енергетичних ринках, геополітиці, фінансовій сфері та світовій економіці продовжують зростати. На цьому складному етапі поява нової економіки з використанням чистої енергії, насамперед сонячної, та електричних транспортних засобів дає перспективу до подальшого розвитку. Продажі споживчих газових котлів також мають тенденцію до зниження і в теперішній час відстають від продажі теплових насосів у багатьох країнах Європи та США. У секторі електроенергетики в усьому світі кількість електростанцій, які працюють на вугіллі та природному газі, скоротилася щонайменше вдвічі порівняно з попереднім десятиліттям. Однак починаючи з 2021 року реєструють збільшення обсягів використання вугілля та нафти. Така тенденція великою мірою є причиною скачка річного зростання викидів CO₂, яке стало найбільшим зареєстрованим за весь період спостереження в новітній історії.

Положення, щодо використання природного газу, який ще в 2018 році вважався найбільш економічним і перспективним видом палива, кардинально змінилися. Упередження щодо безпеки його використання зараз переважають, особливо після того, як росія скоротила постачання газу до Європи та спровокувала зростання цін до чотирьох разів у 2021-2022 роках [17]. З метою стабілізації цін на паливо та зниження ціни на вироблену електроенергію розпочато будівництво нових потужностей для виробництва 250 млрд. кубометрів скрапленого газу щорічно, переважно в США та Катарі. Безперечною перевагою скрапленого газу є можливість його перерозподілу в будь-який момент у місця підвищеного попиту, що створює серйозні труднощі для стратегії диверсифікації росії в бік Азії.

Планувалося, що частка відновлюваних джерел енергії у виробництві електроенергії зросте з 28 % у 2021 році до приблизно 50 % у 2030 році та 80 % до 2050 року [2]. Сподівання, що споживання вугілля впаде з 36 % у виробництві електроенергії у 2021 році до 26 % у 2030 році та 12 % у 2050 році не справдилися [6]. 2023 року використання вугілля в електроенергетичному секторі зросло в багатьох країнах у відповідь на підвищений попит, високі ціни на природний газ і проблеми енергетичної безпеки. Світова генерація електричної енергії за видами палива у 2010 році і 2023 році [6], а також попередній прогноз на 2020 рік, який не було реалізовано [2], наведено на (рис. 1).

Як випливає з рис. 1, попередні прогнози 2017-2018 років щодо зменшення використання природного палива до 37 % не були реалізовані. 2023 року частка використання природних палив залишається на рівні 67%.

Бажання країн прискорити економічне зростання після пандемії наштовхнулося на наслідки від глобальної енергетичної кризи та виникнення широкомасштабних військових дій в Європі, Азії та Африці. Це призвело до зростання обсягів викопного палива, передусім вугілля, на 9%. Якщо світова стабільність не буде забезпечена до 2050 році, обсяг видобутку вугілля впаде лише на (3...7)%. Останні події, ринкові умови та політика змінюють погляди на природний газ та обмежують його використання, водночас підкреслюючи потенціал ядерної енергетики для скорочення викидів та зміцнення енергетичної безпеки. Якщо попит на природні копалини буде залишатися на високому рівні, як це відбувається з вугіллям,

нафтою і газом, то від досягнення глобальних кліматичних та екологічних цілей, задекларованих у [8], потрібно буде відмовитися у найближчому майбутньому. Навіть у разі не розширення зон наявних і прийдешніх військових конфліктів це призведе до подальшого зростання обсягів використання викопного палива та відповідно викидів CO₂ у наступні роки.

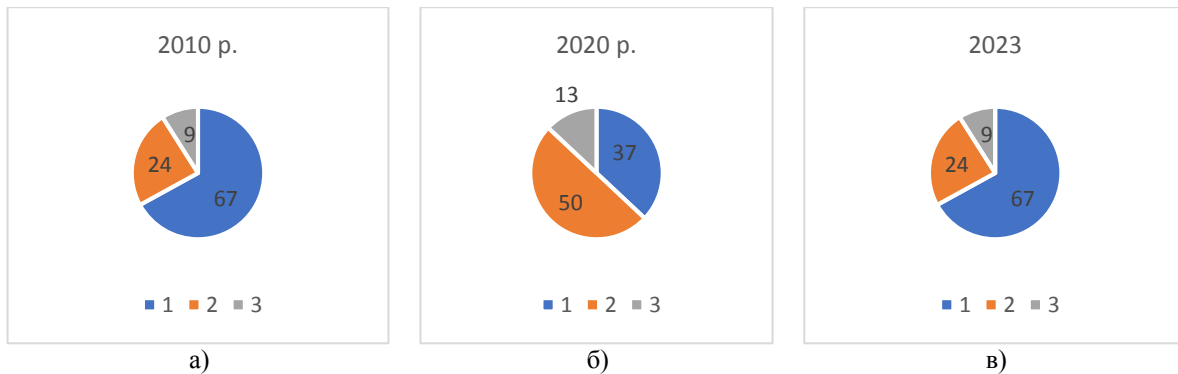


Рисунок 1 - Генерація електроенергії за видами палива: а) 2010 рік; б) прогноз на 2020 рік; в) 2023 рік
Позначення на рис. 1: 1 – природні палива; 2 – відновлювальні джерела; 3 – атомні станції

Енергетична криза, яка призвела до змінення енергетичного балансу, спричинила низку екологічних небезпек, серед яких: підвищена емісія CO₂; забруднення повітря; забруднення ґрунтів і водних горизонтів. Енергетичний сектор утворює майже три чверті викидів, які вже підняли глобальні середні температури на 1,1 °C вище з доіндустріальної епохи, з помітним впливом на погоду та екстремальні кліматичні умови (рис. 2).

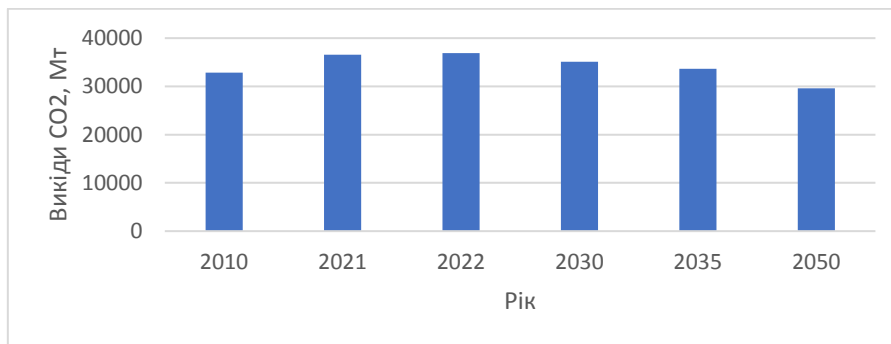


Рисунок 2 - Загальні обсяги викидів діоксиду вуглецю в світі за роками.

2022 року викиди CO₂ в енергетичних системах досягли $36,6 \cdot 10^3$ Мт, що є найбільшим річним приростом в історії [20]. Використання енергетичного устаткування на викопному паливі є основною причиною забруднення повітря, яким вимушено дихати понад 90 % населення світу, що призводить до понад 6 мільйонів випадків передчасної смерті щорічно [18]. Задля захисту населення планувалося впровадження певних заходів, які поєднують мінімальні стандарти щодо викидів вихлопних газів від автомобільного транспорту, зменшення використання вугілля до виробництва електроенергії та паливної деревини до опалення та приготування їжі, що разом може призвести до помірного зниження глобальних викидів основних забруднювачів повітря в період з 2021 по 2050 роки [19].

2021 року електроенергетичний сектор викинув $13 \cdot 10^3$ Мт CO₂, що становить понад третину глобальних викидів CO₂, пов'язаних з енергетикою. Оновлені прогнози засвідчили, що викиди CO₂ в електроенергетичному секторі досягнуть піку в найближчому майбутньому, з можливим скороченням на 40% лише після 2050 року. Такий результат вказує на те, що у глобальних енергетичних системах не запроваджено суттєвих структурних змін задля відокремлення генерації та використання енергії від викидів [21]. Таке зростання до нового рекордного рівня суперечить зобов'язанням країн досягти чистого нульового рівня викидів до 2030 року.

Вирішення екологічних проблем, пов'язаних з обмеженням викидів CO₂ та глобального потепління до 1,5 °C у 2050–2100 роках, стало проблематичним і складним до реалізації. 2023 року приріст глобальної середньої температури поверхні вже наблизився до 1,2 °C вище за доіндустріальний рівень, що спричиняє хвилі потоків теплоти, буревії, повені, лісові пожежі та інші екстремальні погодні явища. Очікується, що хвилі спеки та зростання потреби в охолодженні будуть збільшуватися з частотою та інтенсивністю

зовнішньої температури повітря [22]. У міру підвищення середньої температури зростатиме кількість країн, в яких цей процес буде становитиме небезпеку для здоров'я населення [23]. Доступ до послуг охолодження приміщень, транспорту, житлових помешкань ставатиме найважливішим для здоров'я населення, комфорту та продуктивності праці, і відсутність доступу до послуг охолодження все частіше утворюватиме осередки соціальної напруженості. Прогнозують, що до 2050 року кількість людей, котрі матиме хоч якусь потребу в охолодженні, зросте щонайменше до 9,4 млрд (понад 95% населення планети), що майже на 2 млрд більше, ніж нині. Планують, що світовий запас побутових кондиціонерів зросте з 1,5 мільярда одиниць у теперішній час до 2,2 мільярда у 2030 році та 4,4 мільярда у 2050 році.

В Україні 2022 року флуктуація температури повітря на всій території перевищила загальносвітову на (0,4...2,1) °С. Стійке підвищення температури повітря зафіксовано за усіма сезонами: перевищення середньорічної температури становить 1,4 °С; влітку приріст досягнув 1,8 °С; взимку – 2,1 °С [24].

Використання викопного палива призводить до забруднення повітря. За останні роки забруднене повітря є причиною щонайменше 19 000 надлишкових смертей щоденно. 2021 року забруднення повітря в приміщеннях стало причиною близько 3,6 мільйонів передчасних смертей, забруднення зовнішнього повітря – 4,2 мільйона. Поряд з тим забруднення повітря призводить до суттєвого підвищення витрат з державних фондів. Виникають прямі витрати, наприклад, пов'язані з наданням додаткової медичної допомоги, та непрямі витрати, наприклад, пов'язані з додатковими випадками від втрати працівниками працездатності або забрудненням сільськогосподарських земель та питної води [25]. Підраховано, що глобальні витрати на медичне обслуговування хворих через вплив забрудненого повітря з дрібними твердими частками діаметром до 2,5 microns (індекс AQ1 PM2.5) становлять до 6% світового ВВП і понад 10% у деяких країнах, зокрема в Індії та Китаї [26].

Україна перебувала на 43 місці в світі до війни за рівнем забрудненості повітря і на 8-му – в Європі [27], зі середньозваженою концентрацією 15 µg/m³ за допустимої концентрації 5 µg/m³. Ведення активних бойових дій на території країни катастрофічно погіршує якість повітря та стан водних горизонтів та ґрунтів. З 2022 року в Україні спостерігається суттєве зростання рівня забруднення повітря. Прямий вплив бойових дій – це детонування снарядів, використання артилерійської зброї, авіабомб та бойової техніки. За даними Державної служби з надзвичайних ситуацій упродовж тільки трьох місяців війни на території України знешкоджено понад 120 тисяч вибухонебезпечних предметів, зокрема 1 978 авіаційних бомб [28]. Водночас російська армія випустила по Україні до 5 000 за перший рік війни і 1 500 ракет – за другий. У деяких випадках ці ракети влучали в українські склади боєприпасів, які теж детонували. Від таких вибухів в атмосферне повітря викидаються свинець, сажа, вуглець й інші шкідливі речовини. Залишки снарядів містять сірку, мідь, залізо та вуглець і залишаються на поверхні, забруднюючи шари ґрунтів і води, що згодом спричинить отруєння людей і тварин. Розливання та розливи нафтопродуктів, як результат ушкодження механізованих колон бойової техніки, також спричиняє небезпечне забруднення ґрунтів і природних джерел питної води [29]. Непрямий вплив бойових дій – це пожежі в екосистемах, вибухи нафтобаз, атаки на промислові об'єкти та склади з хімічною сировиною та іншими небезпечними речовинами, наприклад, пінополіуретаном, мінеральними добривами, лакофарбовими виробами, аміачною селітрою тощо. Нафтобази були й залишаються однією з головних цілей російських ракет. Станом на 24 травня 2024 року зафіксовано 36 влучань в об'єкти нафтової інфраструктури [28]. Від пожеж на нафтобазах в атмосферне повітря викидаються важкі метали, діоксид сірки, сажа, оксиди азоту тощо. Такі забруднення, потрапляючи у ґрунт, з часом погіршують якість підземних та поверхневих вод. Обсяг викидів від загоряння лісів, нафтобаз та інших об'єктів становить 182 мільйони тон шкідливих речовин щорічно. Розгортання військових дій з використанням зброї масового руйнування на економічно розвинутих територіях означає, що 2030 року кількість людей, котрі піддаватиметися впливу повітря з високими концентраціями забруднення дрібними твердими частинками (PM2.5), збільшиться на 640 мільйонів порівняно з 2021 роком.

2023 року країни виконали свої державні зобов'язання стосовно обмеження викидів та очищення повітря менше як на 20%, поряд з тим заплановані фінансові витрати необхідно закрити до 2030 року задля утримання напряму руху до досяжності 1,5 °С. Фінанси є відсутньою ланкою до прискореного розгортання відновлювальних джерел енергії в країнах, що розвиваються. Натомість, щоб привести світ на шлях до обмеження приросту температури на рівні 1,5 °С, потрібно збільшити щорічні інвестиції в проекти та інфраструктуру чистої енергетики до майже 4 трильйонів доларів США до 2030 року.

За останній рік електроенергетичні системи через коливання цін на паливо, розподіл енергії та інфляцію зіткнулися з низкою проблем щодо доступності та безпеки. За оцінками фахівців ринкова кон'юнктура та енергетична криза підвищили середньосвітову вартість постачання електроенергії майже до 30% у 2022 році. Європейський Союз стикається з особливим тиском після потроєння оптових цін на електроенергію в першому півріччі 2022 року порівняно з попереднім роком. Здебільшого це є наслідком рекордно високих цін на природний газ, поряд з тим це також відображає здороження вугілля і нафти та посилюється зниженням доступності до атомної та гідроенергетики. Поточне інфляційне середовище

також впливає на зростання витрат до компонентів відновлювальних джерел, серед яких сонячні фотоелектричні модулі, батареї та інвертори. 2022 року витрати на сонячні та гібридні міні-мережі зросли принаймні на 20%, порівняно з рівнем 2019 року. Це також створює проблеми щодо виконання запланованих контрактів на нові проекти, обмежуючи активність інвесторів у 2024 році. Збільшення інвестицій у розвиток масового виробництва компонентів, а саме сонячних фотоелектричних систем, вітрових турбін, побутових теплових насосів та стаціонарних акумуляторів 2023 року зареєстровано тільки в США.

Такі негативні економічні наслідки призвели до зростання кількості людей, котрі живуть у крайній бідності, сповільнюючи прогрес забезпечення загального доступу до електроенергії та чистого приготування їжі. Натомість такий процес посилюється фінансовою кризою, яка примушує енергетиків до відмови від будівництва та використання відновлювальних джерел енергії. 2022 року вперше за десятиліття кількість людей у всьому світі, котрі не мають доступу до електроенергії, зросла та досягла 774 мільйонів, що означитиме збільшення на 20 мільйонів людей порівняно з 2021 роком. Окремо потрібно відзначити, що постійні артилерійські та ракетні обстріли призвели до обмеженого доступу до систем тепло та електропостачання практично всіх громадян на території України.

Внаслідок кризи виникли три взаємопов'язані проблеми щодо подальшого розвитку систем електропостачання: зростання цін на електроенергію для промислових та побутових споживачів; обмежене впровадження резервних джерел енергії; гальмування розвитку електричних мереж. Електричні мережі є основою електроенергетичних систем і потребують розширення та модернізації для підтримки енергетичного переходу. Ризики, пов'язані з процесом потепління, призводять до екстремальних погодних явищ (спеки, пожежам, холодам), що безумовно впливає на перенавантаження електромереж та спричиняють їх аварійне відключення. Загальну довжину мереж систем електропостачання потрібно збільшити майже від 30% до 90% з 2021 до 2050 року. З цієї метою щорічні інвестиції в мережі повинні зростати орієнтовно з 300 мільярдів доларів США в попередні роки до (550...630) мільярдів доларів США до 2030 року і (580...830) мільярдів доларів США до 2050 року. Однак реалізація складних проектів навіть за таких інвестицій може зайняти десятиліття, що в більшості випадків вдвічі довше, ніж розробка інфраструктури сонячних фотоелектричних і вітрових станцій чи зарядних станцій до електромобілів. Довгострокове планування є найважливішим чинником і вимагає високої компетенції фахівців, оскільки потрібно враховувати чинники з високим рівнем невизначеності, серед іншого: зростання попиту; збільшення обсягів регульованих відновлюваних джерел енергії; а також можливості для цифровізації.

Регулювання електричної системи є фундаментом безпеки електропостачання. Змінення структури попиту та зростання обсягів сонячної фотоелектричної та вітрової енергетики подвоюють потреби в гнучкості до 2030 року та збільшують їх майже вчетверо до 2050 року. На нинішньому етапі регулювання в енергетичних системах передусім забезпечується тепловими та гідроелектричними. Вважається, що таке завдання можна вирішити в майбутньому через застосування водню, акумуляторів, викопного палива з уловлюванням вуглецю, заходів з реагування попиту, біоенергетики та іншими відновлюваними джерелами енергії, які підлягають диспетчеризації.

Електроенергія забезпечує зростаючу частку загального кінцевого споживання енергії в усіх економіках. За прогнозами [6] світовий попит на електроенергію зросте на 5 900 ТВт·год за сценарієм заявленої політики (STEPS) і понад 7 000 ТВт·год за сценарієм оголошених зобов'язань (APS) до 2030 року, що еквівалентно додаванню поточного рівня попиту в Сполучених Штатах та Європейському Союзі. У країнах з розвинутою економікою транспорт суттєво підвищуватиме попит на електроенергію, оскільки частка ринку електромобілів зростатиме з 8% у 2021 році до 32% у STEPS і майже до 50% у APS до 2030 року.

У країнах з ринками, що формуються, і країнах, що розвиваються, зростання населення та зростання попиту на охолодження призведе до збільшенню попиту на електроенергію. У Китаї до 2030 року частка власників кондиціонерів зросте майже приблизно на 40% порівняно з поточними рівнями. Прогнозований світовий попит у 2050 році на електроенергію підвищиться на 75% від нинішнього за сценарієм STEPS, на 120% – за сценарієм APS і на 150% – за сценарієм Net Zero Emissions by 2050 (NZE).

За останнє десятиліття виробництво сонячної енергії суттєво розширилося, збільшившись у декілька разів у всьому світі. Більш як 100 країн завершили проекти будівництва сонячних фотоелектричних станцій у 2022 році з використанням здебільшого імпортованих сонячних модулів, які виробляють у 40 країнах, серед яких Китай є основним експортером [30]. Очікувалося, що така тенденція продовжуватиметься підвищеними темпами, оскільки інвестиції, які планувалися, мали збільшити загальні потужності виробництва сонячних модулів приблизно з 640 ГВт у 2016 році до 9 200 ГВт у середньостроковій перспективі до 2030 року. Однак 2023 року цей процес сповільнився та у вересні 2023 року було опубліковано оновлену програму «Нульові викиди до 2050 року» (NZE), в якій передбачено зведення до нуля шкідливих викидів в атмосферу та досягнення нульових викидів до 2050 року [31]. У програмі наголошується: «Потрібно декарбонізувати енергетичний сектор. 25 відсотків енергії Європейський Союз отримує від відновлювальних джерел, і ми поставили мету досягти 38 відсотків до

2030 року». На рис. 3 наведено встановлену потужність сонячних і вітряних станцій фактичну за 2019-2023 роки і прогнозовано на 2030 рік.

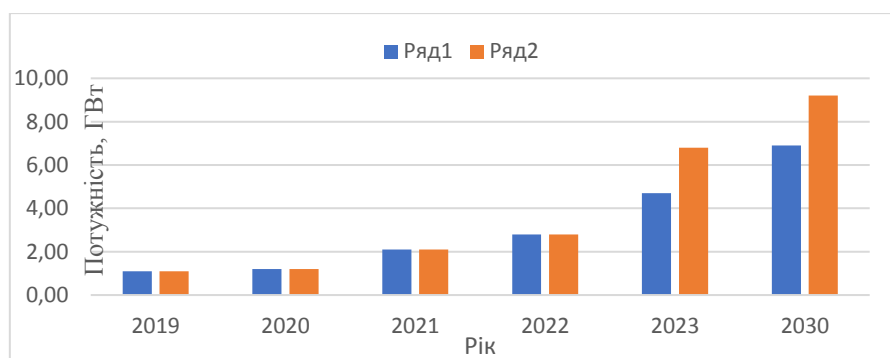


Рисунок 3 - Встановлена потужність сонячних і вітрових станцій: ряд 1 – за прогнозами 2023 року; ряд 2 – за прогнозами 2020 року.

Як випливає з рис. 3, процес вводу в експлуатацію сонячних і вітрових станцій відбувається повільніше ніж прогнозувалося у 2020 році [3]. Прогнози 2023 року [6] не передбачають різкого зростання відновлювальної енергетики, зменшуючи введені до 2030 року потужності на 33%.

Прогнозується, що до 2030 року в Китаї кількість сонячних фотоелектричних і морських вітрових електростанцій зросте на 30%. Перспективи ядерної енергетики також покращилися, чому сприяло продовження терміну служби діючих атомних реакторів у Японії, Кореї та Сполучені Штатах, а також впровадження нових реакторів у європейських країнах.

Відновлювані джерела енергії, зокрема сонячні фотоелектричні та вітрові станції, отримують найбільше переваг серед усіх джерел енергії в цьому десятилітті. Планують, що на них буде припадати 43% виробництва електроенергії в усьому світі в 2030 році, порівняно з 28% 2023 року. Прискореними темпами росте виробництво сонячних панелей у 40 країнах (рис. 4). Планується підвищити середній коефіцієнт використання сонячних модулів з 0,4 до 0,6 [6].

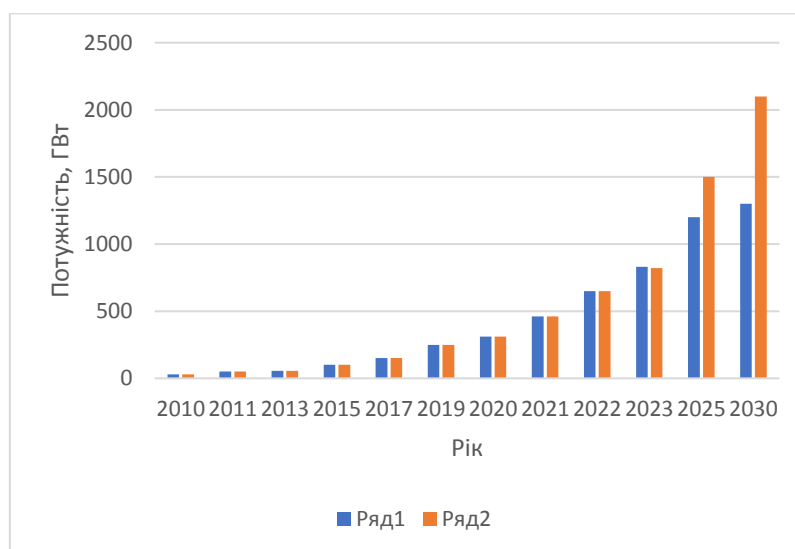


Рисунок 4 - Приріст глобального виробництва і встановленої потужності сонячних панелей: ряд 1 – за сценарієм STEPS; ряд 2 - за сценарієм APS.

Передумови сьогодення вплинули на змінення балансу технологій чистої енергетики, які використовують для досягнення цілей зі скорочення викидів. Деяке скорочення під час впровадження додаткових потужностей вітрових станцій [32] поряд з розвитком сонячної фотоелектричної енергії та прискорені темпи у впровадженні теплових насосів у будівлях створюють очікування, що такі станції забезпечать до 40% у загальній світовій генерації до 2030 році.

Натомість світова економіка стикається з проблемами, які заважають або суттєво гальмують розвиток інноваційних технологій. З поміж причин, які вже зафіксовані у 2023 році, такі:

1. Інвестиції в чисту енергетику в країнах з ринками, що формуються, і країнах, що розвиваються, перестали зростати. Вважається, що це спричинено процесом закупівлі підвищених обсягів резервних енергоносіїв та продовольчих товарів через їх постійне подорожчання;

2. Зруйновано збалансоване поєднання інвестицій у відновлювальні джерела, у електростанції з традиційними джерелами з низьким рівнем викидів CO₂ та в енергетичну інфраструктуру. Такі плани потрібно неодмінно доповнювати більшими, розумнішими та переоптимізованими інфраструктурними мережами. Довоєнна мережева інфраструктура в Україні є яскравим прикладом дисбалансу: час очікування підключення нової відновлювальної станції до мережі займав кілька років і, схоже, далі буде збільшуватися, а не скорочуватися. Це заважає ефективності впровадження поточних проєктів і ставить під сумнів доцільність впровадження нових;

3. Перехід до відновлювальних джерел підвищує попит на критично важливі природні мінерали та окремі елементи. Нині через військові дії виникли занепокоєння щодо постійного, вчасного, дешевого постачання критично важливих мінералів задля технологій виробництва електроенергії, електромереж, акумуляторних батарей та електромобілів;

4. Складнощі, які обмежують реалізацію співпраці між урядами країн. Вочевидь, об'єднання спільних зусиль прискорить розвиток технологій відновлювальної енергетики, забезпечить розширення та економічно ефективне постачання енергії, створить об'єднані енергосистеми з резервованими мережами, які можуть забезпечити надійне енергопостачання у разі виникнення відмов чи аварійних ситуацій.

У ході теперішніх подій тривають енергетичні змінення, які зміщують попит між окремими видами палива та джерелами електроенергії, водночас посилюючи в кінцевому підсумку контроль над власниками ресурсів викопного палива. Процес буде тривалим та виробники викопного палива, зокрема Організація країн-експортерів нафти залишатимуться впливовими. Попит на нафту буде зростати на 0,8% щорічно до 2030 року та досягне максимального піку приблизно на рівні 103 мільйони барелів щоденно. Але з часом (на межі 30-х-40-х років за прогнозами) попит буде зменшуватися, оскільки споживачі розвивають все більший спектр досконалих технологій отримання енергії від відновлювальних джерел, які з часом стають рентабельнішими та економічно привабливішими. Енергетична криза підтверджує такі прогнози, оскільки розгортання відновлюваних джерел енергії та підвищення їх ефективності в Європейському Союзі замістило майже 20 млрд кубометрів газу і нафти, що становить 25% від створеного росією штучного дефіциту в постачанні. Поряд з тим швидке збільшення продажу електротранспорту викликає оптимізм щодо обмеження видобутку нафти.

Попит на енергію в країнах з розвинутою економікою буде скорочуватися впродовж решти цього десятиліття орієнтовно на 0,5% щорічно. Прогнозується, що попит на енергію продовжить зростати в країнах з ринками, що формуються, і країнах, що розвиваються, на 1,4% щорічно. Дії спрямовані на скорочення споживання енергії, прогнозоване здешевлення палива, заплановані перезапуски атомної енергетики та подальше впровадження відновлювальних станцій – такі запропоновані заходи дають змогу вирішувати поставлені раніше світові проблеми. Впевненість у вирішенні поставлених завдань надають підтвердження з боку 83 країн та Європейського Союзу виконувати вчасно та в повному обсязі зобов'язання стосовно цілей щодо нульового рівня викидів CO₂. Це можливо прискорить процес переходу до отримання енергії від відновлювальних джерел. Беручи до уваги поточну ситуацію в енергетиці в Україні, потрібно усвідомити, що розвиток відновлювальної енергетики всередині країни безумовно може стати активом у часи геополітичного напруження.

Висновки

Світова енергетична криза, спровокована війною росії проти України, привернула увагу до важливості забезпечення швидких та впорядкованих перетворень в енергетиці з орієнтацією на екологічні проблеми та наслідки для кожної країни. Дії росії на енергетичних ринках газу і нафти спричинили поштовх інфляції та зростання цін на паливо, електроенергію та продовольство.

Головною метою розвитку світової енергетики на період до 2035 року визначено забезпечення енергетичної та екологічної безпеки і перехід до енергоефективного та енергоощадного використання і споживання енергоресурсів з впровадженням інноваційних технологій. Дії, які спрямовані на скорочення споживання енергії, прогнозоване здешевлення викопного палива, заплановані перезапуски атомної енергетики та подальше впровадження відновлювальних станцій – такі запропоновані заходи дають змогу вирішувати поставлені світові проблеми.

Відповідно до прогнозів International Energy Agency в енергетиці задля створення умов стосовно обмеження зростання глобального потепління до 2050 року, потрібно реалізувати щонайменше такі сфери діяльності:

1. Активізувати державну політику з виробництва альтернативних джерел енергії. Зростання обсягів використання викопного палива частково зумовлено нездатністю країн прискорити зростання обсягів інвестицій у розвиток альтернативної енергії та інфраструктури систем електропостачання.

2. Впровадити інноваційні технології та відповідні види палива, використання яких дає змогу зменшити викиди CO₂. Потрібно передбачити будівництво потужних електростанцій із застосуванням

палива з низьким рівнем викидів, насамперед АЕС, а також впровадження технологій для уловлювання CO₂ та його постійного зберігання або перетворення на кліматично нейтральне.

3. Закінчити військові дії в Європі та Близькому Сході, посилити контроль за дотримання базових положень міжнародного права, впроваджуючи дієві зміни в геополітиці.

Вивчення та усвідомлювання світового досвіду та перспективних напрямів розвитку електроенергетичних систем дасть змогу швидко відновити, перетворити та реформувати енергетику України у післявоєнний період.

Список використаної літератури

1. World Energy Outlook 2017 (WEO-2017). [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>
2. World Energy Outlook 2019 (WEO-2019). [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
3. World Energy Outlook 2020 (WEO-2020). [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020/overview-and-key-findings>
4. World Energy Outlook 2021 (WEO-2021). [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
5. World Energy Outlook 2022 (WEO-2022). [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
6. World Energy Outlook 2023 (WEO-2023). [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
7. Перетворення нашого світу: Порядок денний в області сталого розвитку на період до 2030 року», від 25 вересня 2015 року. [Retrieved from] <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku>
8. Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату (UNFCCC). [Retrieved from] https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_044#Text
9. Виступ державного секретаря США Blinken A.J на засіданні Ради безпеки ООН. [Retrieved from] <https://www.c-span.org/video/?526259-1/un-security-council-meeting-russian-invasion-ukraine>
10. Building a Unified National Power Market System in China. [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/building-a-unified-national-power-market-system-in-china>
11. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach. [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>
12. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Блінов І.В. Енергетичний менеджмент: нові пріоритети XXI століття. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 1. С. 7-27. DOI 10.20535/1813-5420.1.2024.297508
13. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Блінов І.В. Цифрова трансформація: сучасні тенденції та завдання. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2023. № 65. С. 5-14. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.005>
14. Fahad Zia M., Elbouchikhi E., Benbouzid M. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied Energy*. 2018. Vol. 222. Pp. 1033-1055.
15. Кириленко О.В., Блінов І.В., Зайцев С.О., Палачов С.О., Васильченко В.І. Впровадження міжнародних та європейських стандартів для розвитку ОЕС України згідно з концепцією Smart Grid. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2022. № 63. С. 5-12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.005>
16. Кириленко О.В. Заходи та засоби перетворення енергетики України на інтелектуальну екологічно безпечну систему. *Вісник Національної академії наук України*. 2022. № 3. С. 18-23.
17. REPowerEU. План стрімкого зниження залежності від російського викопного палива і швидкого просування «зеленого переходу» [Retrieved from] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/uk/IP_22_3131
18. Reza Perdana M., Noor Alamsyah M., Sigit Sukmono S, Andri Hendriyana A. Identification of AVO Attribute Response to the Presence of CO₂ Content Using AVO Modelling Method in Lower Talang Akar Formation (LTAF), South Sumatra Basin. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)*. DOI: 10.17794/rgn.2024.3.8
19. Regulation (eu) 2023/956 of the european parliament and of the council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism. *Official Journal of the European Union*. L 130/52. 16.5.2023. [Retrieved from] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0956>
20. Government Energy Spending Tracker: June 2023 update. [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/government-energy-spending-tracker-2>
21. Polyanska A., Pazynich Y., Mykhailyshyn K., Babets D., Toš P. Aspects of energy efficiency management for rational energy resource utilization. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)* DOI: 10.17794/rgn.2024.3.2
22. WHO. Health factors involved in working under conditions of heat stress. Report of a WHO scientific group. Geneva: World Health Organization, 1969:1-32. Accessed December 23, 2023. [Retrieved from] https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/40716/WHO_TRS_412.pdf?sequence=1.
23. Bach Aaron J. E., Thepaksorn P., Thepaksorn Hom E.K., Borg D.N. Practical cooling interventions for preventing heat strain in indoor factory workers in Thailand. *Americal Journal of industrial medicine*.2024. Vol. 67. Is. 6. DOI: 10.1002/ajim.23589
24. Сайт Гідрометцентру України. [Retrieved from] https://www.facebook.com/UkrHMC/?locale=uk_UA

25. Третьякова Л.Д., Панасюк І.В., Мітюк Л.О. Метод ідентифікації небезпек та прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій у разі забруднення ґрунту сполуками важких металів. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 3. С.115-125. DOI 10.20535/1813-5420.3.2022.272097.

26. World Bank. (2023). State and Trends of Carbon Pricing 2023. [Retrieved from] <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/39796>

27. World Air Quality Report 2023. [Retrieved from] https://www.iqair.com/dl/2023_World_Air_Quality_Report.pdf?srsltid=AfmBOopwMb4AiHLTaSRUBp4ohy2IyT-QYHOКсGARLQvGXmOjk3CkdEBc

28. Державна служба з надзвичайних ситуацій України [Retrieved from] <https://dsns.gov.ua/>

29. Tretiakova L., Mitiuk L. Mathematical modelling technique to assess soil conditions. *New Technologies in Environmental Science*. 2023, № 3, P. 103-106. DOI: 10.53412/jntes-2023-3-4

30. Solar PV Global Supply Chains. [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>

31. Матеріали 26-та Конференція ООН з питань зміни клімату у Глазго, 1-12 листопада 2023 року. [Retrieved from] <https://www.ukrinform.ua/rubric-world/3263883-nulovi-vikidi-do-2050-roku-velika-simka-pogodila-splini-klimaticnicili.html>

32. Кирик В.В., Штефурца С.О. Європейська офшорна мережа з вітровими електростанціями. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 4. С. 112-118. DOI 10.20535/1813-5420.4.2023.290938

L. Tretiakova¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0001-5244-746X
V. Pobigaylo¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2673-7329
E. Usatii¹, student

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

CHANGES IN THE GLOBAL ENERGY SECTOR CAUSED BY RUSSIA'S WAR AGAINST UKRAINE

Problems. *The Russian invasion of Ukraine, Russia's refusal to accept the planned volumes of natural gas to the countries of the European Union caused a global energy and financial crisis, and changed the movement towards the development of renewable energy. the transition to sustainable and clean energy sources has become problematic for many countries.*

Objective. *General review and analytical analysis of trends in the development of energy consumption and the introduction of renewable sources in electric power systems in 2017-2023 using the results of research International Energy Agency (IEA), listed in World Energy Outlook (WEO) [1-6].*

Methodology of implementation Trends in the development of the world system of renewable power plants to ensure climate neutrality, zero emissions, and a clean ecological environment have been analyzed for the study of the topic article. The study of changes and ways to limit the negative consequences of hostilities in Europe and the Middle East was carried out according to the long-term plans of the IEA.

Results. *An overview of changes in the structure of energy resources in the world energy balance is presented. It is shown that the energy crisis has led to a sharp increase in the production of fossil fuels, primarily coal and oil. The construction of new capacities for the production of 250 billion tons of liquefied gas has begun. in order to stabilize fuel prices and reduce the price of electricity. Statistical and forecast information on the structure of the world energy balance and annual electricity production by types of generation is provided.*

The environmental negative consequences registered for the last three years are considered: increased CO₂ emissions; air pollution with fine dust; pollution of soils and water horizons; changes in climatic indicators. The problems that have arisen for the implementation of new projects for the construction of renewable sources, the development of electric power infrastructure, security and reliability of power supply are analyzed. An analysis of the proposed measures under several scenarios to increase the production and use of solar, wind and nuclear energy, reduce dependence on traditional energy sources and the prospect of zero carbon dioxide emissions by 2030 is carried out.

Conclusions. *Actions aimed at reducing energy consumption, projected reduction in fuel prices, planned restarts of nuclear power and further implementation of renewable power plants – these are the proposed measures that make it possible to solve the problems that have arisen around the world. Confidence in meeting the tasks is confirmed by 83 countries and the European Union to meet their commitments to achieve zero carbon dioxide emissions on time and in full. Learning from the experience and directions of development of the world energy sector will create an opportunity for the rapid restoration of the energy structure in Ukraine in the post-war period.*

Keywords: *energy crisis, environmental consequences, renewable energy, carbon dioxide emissions.*

Надійшла: 29.09.2024

Received: 29.09.2024

А.П. Заболотний¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-8696-661X

Д.В. Федоша¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-0683-0561

В.В. Дяченко¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-8705-9683

Ю.Б. Ліуш¹, канд. техн. наук, доцент

¹Національний університет “Запорізька політехніка”

ПОБУДОВА СТРУКТУРИ СІЛЬСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З УРАХУВАННЯМ НАЯВНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Зазначено, що хоча частка відновлюваних джерел електричної енергії продовжує зростати і стрімко розвивається, однак галузь все ще стикається з багатьма проблемами, зокрема, як продовжувати знижувати втрати електричної енергії та річні приведені витрати, покращити ефективність експлуатації та обслуговування, підтримувати стабільність електромережі, забезпечити безпеку та надійність роботи системи електропостачання що містять відновлювані джерела електричної енергії.

Показано, що ефективне рішення зазначених проблем можливе лише на основі аналізу перспектив розвитку локальних електроенергетичних систем, які містять відновлювані джерела електричної енергії, розробки механізмів технічного та організаційного забезпечення, які сприятимуть побудові сучасних системних (схемотехнічних) рішень.

Запропоновано застосувати метод потенційної поверхні для побудови оптимальної структури сільської електричної мережі при її проектуванні та модернізації в умовах присутності в ній відновлюваних джерел електричної енергії, який дозволяє оптимізувати структуру мережі з точки зору втрат електричної енергії та зниження річних приведених витрат.

Описано алгоритм формування структури систем електропостачання, який реалізує одночасне вирішення завдань визначення кількості вузлів навантаження, розподілу між ними електроприймачів, визначення конструкції джерел живлення, врахування дискретності конструкції елементів системи.

Наведено результати чисельного моделювання на основі запропонованого алгоритму на прикладі розв'язання задачі реконструкції ділянки сільської електромережі.

Ключові слова: *сільські електричні мережі, відновлювані джерела енергії, метод потенційних поверхонь, структура систем електропостачання, вузол навантаження, електроприймач, джерело живлення, втрати електричної енергії.*

Вступ

У сучасних умовах повномасштабної війни та зростання цін на первинні енергоносії всі галузі промислового виробництва України гостро потребують розосереджених та альтернативних джерел електричної енергії. Особливу потребу в них відчуватимуть у післявоєнні роки агропромислові комплекси (АПК), на яких буде покладено завдання якнайшвидшого відновлення економіки країни. Сільські електричні мережі (СЕМ), як відомо, відрізняються великою протяжністю, розгалуженістю при порівняно малій потужності, що передається, а також використанням низьких класів напруги. Тенденції зростання тарифів на електричну енергію обумовлюють значне збільшення складової вартості втрат електричної енергії (ВЕЕ) в мережах при її передачі та розподілі й як наслідок - збільшення річних приведених витрат.

Ще у довоєнний період спостерігалось постійне зростання частки «малої» генерації в енергобалансі підприємств АПК. Це пов'язано з широким впровадженням відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ). Найбільш широке впровадження отримали сонячні та вітроелектростанції, малі ГЕС, когенераційні установки на біопаливі тощо. Останнім часом, все більш широко стали вводитися в експлуатацію об'єкти з комплексним використанням декількох ВДЕ, які виробляють вже промислові обсяги електроенергії як для власних цілей з можливістю мережевого підключення, так і для продажу електроенергії в мережу або іншим споживачам [1].

На жаль, на сьогоднішній день АПК при використанні електроустановок на основі альтернативних джерел енергії стикаються із низкою проблем системного характеру. Так, якщо питання оцінки потенціалу сонячної, вітрової енергії та енергії річок досить докладно вирішені, то при підключенні ВДЕ до існуючої мережі виникає задача пошуку місця її підключення. Найчастіше підключення таких джерел генерації до СЕМ неузгоджене, що призводить до складності керування та прогнозування режимів роботи мереж,

зростання складової втрат електричної енергії ВЕЕ, оскільки структура їх перестає бути оптимальною з точки зору мінімуму приведених витрат. Крім того, збільшення частки ВДЕ в загальному обсязі генерованої електроенергії створює ряд загальносистемних технічних проблем [2-4]:

- ускладнення диспетчерського управління електроенергетичною системою;
- кожне ВДЕ має свої динамічні характеристики і можливості управління, що тягне необхідність вирішення проблем електромагнітної сумісності;
- ускладнення системи релейного захисту та автоматики, а також протиаварійного управління;
- збільшення струмів короткого замикання, що призводить до заміни комутаційних апаратів, зміни налаштувань захистів та ін.

Але основна проблема неузгодженого приєднання розрізаних ВДЕ до мережі - це складність керування та прогнозування режимів роботи енергосистеми, пов'язані з перетіканням потужностей у мережі та як наслідок – збільшення ВЕЕ [5].

Зменшення складової вартості ВЕЕ можливо лише шляхом оптимізації (побудові сучасних схемотехнічних рішень) структури СЕМ під час реконструкції існуючих мереж електропостачання.

Аналіз стану питання

Ключовою проблемою при формуванні оптимальної структури мережі електропостачання є задача визначення кількості джерел живлення і розподіл за ними приймачів електроенергії, а також обладнання проміжних вузлів навантаження (рівнів розподільчої мережі) з урахуванням розрізаних ВДЕ.

Основні підходи при вирішенні задачі побудови оптимальної структури мережі електропостачання базуються на використанні оціночних та оптимізаційних моделей [6]. Перші служать для визначення техніко-економічних показників для заданого проектувальником варіанту мережі. Другі - для визначення оптимального варіанту конфігурації мережі в межах прийнятих проектувальником припущень відповідно до прийнятого критерієм оптимальності. При цьому в оптимізаційних моделях необхідно враховувати дискретність деяких величин (переріз проводів та кабелів, потужність і кількість трансформаторів, кількість приєднань до ВДЕ та ін.).

Визначальним чинником формування схеми електричної мережі є місце розташування джерела живлення та траси прокладання її ділянок, які отримані в результаті оптимізації топологічної задачі з урахуванням метричних обмежень, зумовлених розташуванням природних та технологічних об'єктів. Щодо установки ВДЕ, то їх потужність обумовлена потенціалом первинної енергії, соціально-екологічними обмеженнями, а також технічними факторами (встановленою потужністю, коефіцієнтом корисної дії, напругою генерації та ін.). Останні тісно пов'язані з конструктивними та техніко-економічними показниками мережі.

Існуючі підходи до оцінки ефекту від запровадження ВДЕ засновані на обчисленні наступних техніко-економічних показників: початкові капітальні вкладення для будівництва енергетичного об'єкта; вартість землі, що відведена під об'єкт, вартість заходів на охорону навколишнього середовища, витрати на демонтаж об'єктів при виведенні основних фондів або реконструкції; поточні витрати на обслуговування та ремонт, а також амортизаційні відрахування на реновацію основних фондів об'єкта, які є витратною частиною проекту [7].

Очевидний взаємозв'язок між техніко-економічними показниками електричної мережі та ВДЕ вимагає розробки нової моделі електричної мережі, яка буде покладена у методологічну основу її оптимізації з урахуванням застосування всього ряду альтернативних джерел електроенергії. Аналіз існуючих підходів до формування структури систем електропостачання показав, що існує метод, здатний вирішувати вище перераховані задачі одночасного - це метод еквіпотенціальних контурів [6].

Мета роботи.

Пропонується застосувати метод еквіпотенціальних контурів з метою формування оптимальної структури електричної мережі сільськогосподарського району, що містить ВДЕ з точки зору мінімуму ВЕЕ та зниження річних приведених витрат.

Методи дослідження.

Суть методу еквіпотенціальних контурів полягає в проведенні аналогії між навантаженням приймачів (P_i), розташованих в точках (x_i, y_i) , і потенціалами деяких джерел енергії, розташованих у тих же точках. Потенціали цих джерел дорівнюють навантаженням приймачів. При віддаленні від точки розташування приймача потенціал від джерела, розташованого в тій самій точці, зменшуватиметься і в

деяких віддалених точках потенціал буде близький до нуля [6]. Сукупність усіх потенціалів джерел енергії утворює потенційну поверхню, яку можна описати потенційною функцією:

$$\Pi(x, y) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot e^{-1 \cdot \alpha_{\Delta P_i} [(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]}, \quad (1)$$

де: $\alpha_{\Delta P_i}$ – коефіцієнт, який враховує втрати потужності від джерела живлення до приймача

$$\alpha_{\Delta P_i} = \frac{P_i^2 \rho}{U^2 F(P_i)}, \quad (2)$$

де: P_i - потужність приймача; ρ – питомий опір матеріалу провідника; U_i - напруга; $F(P_i)$ - переріз провідника визначається як функція від переданої потужності.

Використання запропонованого коефіцієнта $\alpha_{\Delta P_i}$ (вираз (2)) дає можливість відразу оцінити ступінь майбутніх ВЕЕ в провідниковому матеріалі під час визначення центру електричних навантажень. Крім того, запропоновано використання замість еквіпотенціальних контурів, як критерію формування вузлів навантаження, додаткові критерії відбору "потенційний" та "технічний" критерії.

Функція (1) є основою для "потенційного" критерію відбору, за яким на потенційній поверхні, яку утворює функція, визначається точка максимуму потенціалу. Ця точка надалі виступає в ролі центру електричних навантажень. Приймачі, які будуть отримувати живлення від цього центру електричних навантажень за "потенційним" критерієм визначаються як приймачі, які брали участь у формуванні максимуму функції (1). Ці приймачі зараховуються до "потенційної" групи.

Аналогічну поверхню можна побудувати і для ВДЕ, де P_i приймає значення рівне величині енергії, що генерується таким джерелом енергії, але зі знаком мінус [8].

Накладення цих двох поверхонь призводить до зміни координат максимуму, тим самим уточнюються координати встановлення джерела живлення. Важливим моментом у визначенні цих координат є урахування зон неприпустимості прокладання ліній та встановлення джерел живлення.

«Потенційна група» є закінченим структурним елементом майбутньої розподільчої мережі, але той факт, що при формуванні "потенційної" групи були враховані лише розташування приймачів відносно один одного і очікувані ВЕЕ в розподільчій мережі, не дає можливості запровадити "потенційну" групу в майбутню розподільчу мережу, так як крім врахованих факторів ще необхідно провести узгодження майбутньої "потенційної" групи з можливим конструктивним виконанням вузла мережі.

Для вирішення цієї задачі використовується "технічний" критерій. "Технічний" критерій відбору виконує функцію узгодження приймачів "потенційної" групи з можливим конструктивним виконанням її джерела живлення. Критерій діє на основі принципу надлишковості "потенційної" групи по відношенню до граничних умов "технічного" критерію. На основі взаємодії "потенційного" і "технічного" критеріїв відбору складається алгоритм методу.

Принцип роботи алгоритму базується на утворенні зворотних зв'язків, які охоплюють обидва критерії і створюють умови для становлення алгоритму як самоорганізуючої моделі побудови структури мережі.

Розглядаючи критерії відбору як граничні умови функціонування моделі, запропонований підхід дає можливість закладення в них дискретності конструктивних умов виконання структури мережі, яка містить ВДЕ, і чим повніше враховані ці умови в критерії відбору, тим більше можливостей якісно вирішити поставлену задачу [8].

Таким чином, побудову структури системи електропостачання, що містить ВДЕ, можна представити у вигляді наступного алгоритму.

На першому етапі будується потенційна поверхня для електроприймачів в режимі споживання.

На другому етапі будується поверхня для режиму, в яких ВДЕ виробляють електроенергію в мережу.

Потім проводиться накладення цих поверхонь і на сумарній поверхні виділяється максимум функції, в координатах якого і буде розташоване джерело живлення.

Важливим моментом у визначенні цих координат є облік зон неприпустимості прокладки ліній і встановлення джерел живлення. Для цього можливо використовувати методи розпізнавання образів, відповідно до яких передбачено розбиття простору об'єкта, на області, які не перетинаються, кожна з яких відповідає відображенню одного і того ж класу, до якого допустимо елементарний математичний опис [8].

На наступному етапі проводиться відбір електроприймачів за «потенційним» критерієм, а потім за «технічним» з урахуванням дискретності конструктивного виконання елементів.

Згідно з "потенційним" критерієм відбору на потенційній поверхні, визначається точка максимуму потенціалу. Ця точка надалі виступає в ролі центру електричних навантажень. Приймачі, які будуть отримувати живлення від цього центру електричних навантажень зараховують до "потенційної" групи.

"Технічний" критерій відбору виконує функцію узгодження приймачів "потенційної" групи з можливим конструктивним виконанням її вузла живлення.

В результаті відбору електроприймачів за вищевказаними критеріями формується група електроприймачів першого джерела живлення, що виключається з подальшого розгляду при формуванні структури мережі.

Після цього, знову будуються дві (якщо залишилися ВДЕ), або одна (якщо всі ВДЕ приєднані до джерел живлення) потенційні поверхні і здійснюється формування групи електроприймачів другого джерела живлення.

У результаті циклічної дії (до того, поки всі електроприймачі не отримають своє джерело живлення) формується радіальна структура системи електропостачання, після чого здійснюється перевірка можливості організації проміжних джерел живлення [8].

На останньому етапі проводиться оцінка можливості (за критеріями мінімуму капітальних витрат і ВЕЕ) заміни окремих ділянок радіальної мережі на магістральні ділянки. Таким чином, метод порівняльної оцінки передбачає аналіз локального ділянки структури мережі з визначенням ряду технічно доцільних варіантів її виконання та подальше порівняння цих варіантів між собою.

Даний підхід дозволяє не тільки автоматизувати побудову оптимальної структури розподільної мережі, що містить джерела «малої генерації», а й знизити розміри капітальних вкладень при побудові такої мережі за рахунок застосування проміжних вузлів навантаження (визначення їх оптимальної кількості та розташування). Блок схема алгоритму побудови структури мереж електропостачання що містять ВДЕ подано на рис. 1.

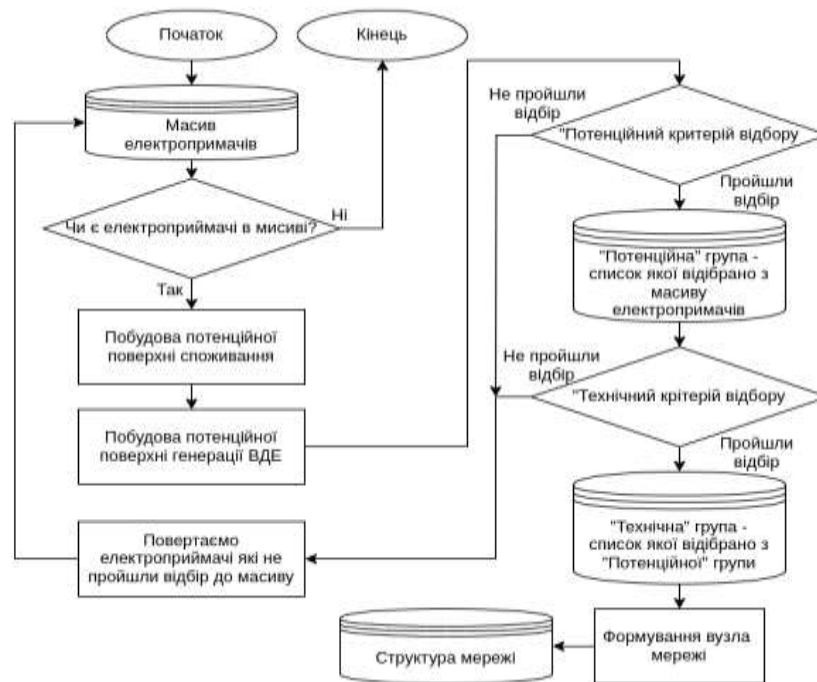


Рисунок 1 - Блок схема алгоритму побудови структури мереж електропостачання що містять ВДЕ.

Запропонований алгоритм був реалізований програмно за допомогою мови програмування Python і пакета математичного обчислення SciPy.

Використання даного алгоритму дозволяє побудувати інженерні методики для попереднього розрахунку структури розподільних мереж що містять ВДЕ, оцінити потенціал вже існуючих мереж, проводити оцінку ефективності їх роботи при модернізації, а також провести оцінку капіталовкладень при реконструкції частини мережі [9].

Результати чисельного моделювання.

Запропонований алгоритм було апробовано на прикладі вирішення задачі реконструкції ділянки СЕМ площею 12 км² з розрахунковим навантаженням на повну потужність 4,4 МВА.

Джерелом живлення є двотрансформаторна підстанція із трансформаторами 2хТМН – 4000/35. Електричні мережі напругою 35 кВ та 10 кВ конструктивно реалізовані повітряними лініями (ПЛ), прокладеними на залізобетонних опорах типу АС.

План електричних мереж напругою 35 кВ (живильна ділянка) та 10 кВ (розподільна ділянка) представлений на рис. 2.

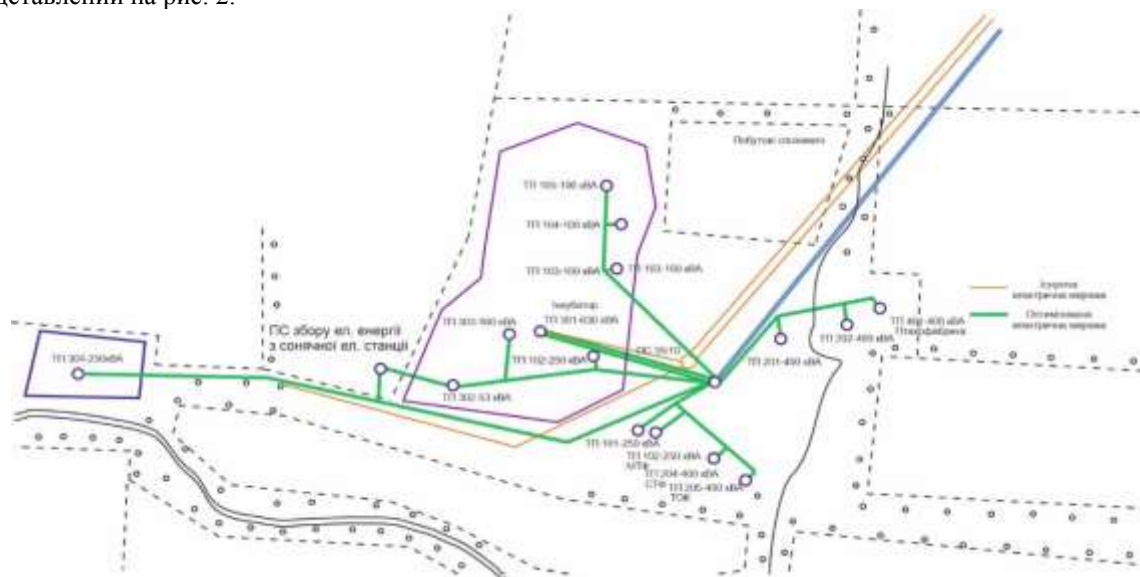


Рисунок 2 - План електричних мереж сільськогосподарського району.

У процесі дослідження було розглянуто такі варіанти електричної мережі:
перший (I) – існуюча система електропостачання сільськогосподарського району із зазначеними вище параметрами;

другий (II) – перший варіант із підключенням ВДЕ сумарною потужністю 440 кВт;

третій (III) – електрична мережа, яка отримана на основі оптимізації розташування джерела живлення з урахуванням підключення ВДЕ.

У табл. 1 - 3 наведено результати чисельного моделювання для кожного з аналізованих варіантів структури СЕМ

Таблиця 1 – Сумарна довжина повітряних ліній

Тип ПЛ	Довжина ПЛ, км		
	Варіанти СЕМ		
	I	II	III
АС-95/16 35 кВ	19	19	18,4
АС-70/11 10 кВ	5,1	5,1	5,1
АС-50/8,0 10 кВ	16,9	15,5	14,2
АС-25/4,2 10 кВ	3,2	3,2	3,2
АС-16/2,7 10 кВ	29,6	20,9	19,5

При підключенні до існуючої мережі сонячної електростанції потрібна спорудження додаткових повітряних ліній напругою 10кВ, які приєднують її до мережі, однак оптимізація структури мережі (варіант III) за допомогою запропонованого алгоритму дозволяє скоротити як сумарну довжину ПЛ 10 кВ, так і ПЛ 35 кВ за рахунок зміни координат встановлення джерела живлення.

Зниження сумарних ВЕЕ для III варіанту склало 17,4% порівняно з базовим варіантом, що при тарифі 6,816 грн/рік складе економію витрат на покриття ВЕЕ – на 439,6 тис. грн/рік.

Аналіз техніко-економічних показників варіантів структури електричної мережі показав, що мінімальні річні приведені витрати досягаються при оптимізації її структури (III варіант) й становлять на 17,2% менше ніж базовий. Це пов'язано з тим, що така складова як витрати на ВЕЕ у приведених витратах дуже суттєва і обумовлена неуклонним зростання тарифів на електричну енергію.

Таблиця 2 – Втрати електричної енергії в повітряних лініях

ПЛ на напрузі	Втрати електричної енергії МВт·год/рік		
	Варіанти СЕМ		
	I	II	III
10 кВ	233,9	206,8	197,0
35 кВ	142,5	118,0	114,0

Таблиця 3 – Техніко-економічні показники варіантів СЕМ

Техніко-економічні показники	Варіанти СЕМ		
	I	II	III
Витрати на амортизацію та експлуатацію, тис. грн/рік	8,2	7,0	6,4
Витрати на покриття втрат електричної енергії, тис. грн/рік	2559,4	2213,8	2119,8
Приведені витрати, тис. грн/рік	2567,6	2220,8	2126,2

Висновки

Запропонований формалізований метод побудови структури СЕМ, що містять ВДЕ, дозволяє врахувати зміну режиму роботи таких мереж та оптимізувати їхню структуру з погляду зниження ВЕЕ в мережах при її передачі та розподілі й як наслідок - зменшення річних приведених витрат.

Крім того, на основі спільного використання оціночних та оптимізаційних моделей запропонований метод дає можливість побудувати оптимальну структуру мережі електропостачання підприємств АПК що містить ВДЕ за замкнутою схемою, що дозволить суттєво зменшити експлуатаційні витрати, що необхідні для підтримки потрібного рівня надійності мережі та підвищити пропускну здатність існуючих мереж в 1,3 - 1,5 разів без додаткових витрат на підвищення перерізу проводів та кабелів.

Список використаної літератури

1. Денисюк С.П., Белоха Г.С., Чернецьук І.С., Лисий В.В. Світові тенденції впровадження відновлюваних джерел енергії та особливості їх реалізації при відновленні економіки України // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2022. – № 4. – С.7–28.
2. Jenkins N., Allan R., Grossley P., Kirschen D., Strbac G. *Embedded Generation*. London; IEE, 2000, 273 p.
3. Barker Ph. P., De Mello R.W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems // 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA, July 11-15, 2000, p. 222 - 233.
4. Papathanassiou S.A., Hatziargyriou N.D. Technical Requirements for the Connection of Dispersed Generation to the Grid // 2001 IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 15 - 19, 2001, p. 134 - 138.
5. Денисюк С.П., Махлін П.В., Шрам О.А., Слинко В.М. Особливості аналізу режимів роботи енергосистеми у районах з альтернативними джерелами електроенергії (вітровими електростанціями) // *Техн. електродинаміка*. – 2022. – № 1. – С. 41–49.
6. V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm for the Program of Energy Saving for Power Supply System," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019, pp. 420-425, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879915.
7. А.П. Заболотний, Д.В. Федоса, Ю.В. Даус Побудова структури мереж електропостачання споживачів АПК, що містять джерела «малої генерації» // *Вісник ХНТУСГ. Технічні науки «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. – 2011. – №. 116. – с. 20-21.
8. V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm of synthesizing energy effective power supply system of industrial enterprises," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2020, pp. 320-325, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160288.
9. А.П. Заболотний, Ю.В. Даус Формалізація процедури підключення джерел розподіленої генерації до електричних мереж. // *Вісник ТДАТУ «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. – 2015. –№. 3. – с.37- 41.

A. Zabolotnyi¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-8696-661X
D. Fedosha¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-0683-0561
V. Diachenko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-8705-9683
Y. Liush¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof
¹National University "Zaporizhzhya Polytechnic"

CONSTRUCTION OF THE STRUCTURE OF RURAL ELECTRIC NETWORKS TAKING INTO ACCOUNT THE AVAILABILITY OF RENEWABLE SOURCES OF ELECTRICITY

It is noted that although the share of renewable electricity sources continues to grow and develop rapidly, the industry still faces many challenges, including how to continue to reduce electricity losses and annualized costs, improve operation and maintenance efficiency, maintain grid stability, ensure safety and reliability of the power supply system containing renewable sources of electrical energy.

It is shown that an effective solution to these problems is possible only on the basis of the analysis of the prospects for the development of local electric power systems that contain renewable sources of electric energy, the development of technical and organizational support mechanisms that will contribute to the construction of modern system (schematic) solutions.

It is proposed to apply the potential surface method for building the optimal structure of the rural electrical network during its design and modernization in the presence of renewable sources of electrical energy, which allows optimizing the structure of the network from the point of view of electrical energy losses and reducing annualized costs.

The algorithm for forming the structure of power supply systems is described, which implements the simultaneous solution of the tasks of determining the number of load nodes, distributing electrical receivers between them, determining the design of power sources, taking into account the discreteness of the design of system elements.

The results of numerical modeling based on the proposed algorithm are presented on the example of solving the problem of reconstruction of a section of the rural electricity network.

Keywords: rural electrical networks, renewable energy sources, potential surface method, structure of power supply systems, load node, power receiver, power source, electrical energy losses.

References

1. Denysiuk S., Bielokha H., Cherneshchuk I., Lysy V. Global trends in implementation of renewable energy sources and features of their implementation during the recovery of Ukraine's economy // *Energy: Economics, Technology, Ecology*. – 2022. – № 4. – P.7–28.
2. Jenkins N., Allan R., Grossley P., Kirschen D., Strbac G. *Embedded Generation*. London; IEE, 2000, 273 p
3. Barker Ph. P., De Mello R.W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems // 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA, July 11-15, 2000, p. 222 - 233.
4. Papathanassiou S.A., Hatziargyriou N.D. Technical Requirements for the Connection of Dispersed Generation to the Grid // 2001 IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 15 - 19, 2001, p. 134 - 138.
5. Denysiuk S., Makhlin P., Shram O., Slynko V. Features of operating modes analysis of the power system in are as with alternative electric power sources (wind power plants) // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2022. – №1. – P. 41–49.
6. V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm for the Program of Energy Saving for Power Supply System," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019, pp. 420-425, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879915.
7. A.P. Zabolotnyi, D.V. Fedosha, Yu.V. Daus Construction of the structure of power supply networks for consumers of agriculture, which contain sources of "small generation" // *Bulletin of KhNTUSG. Technical sciences "Problems of energy supply and energy saving in the agricultural sector of Ukraine"*. – 2011. – №. 116. – p. 20-21.
8. V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm of synthesizing energy effective power supply system of industrial enterprises," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2020, pp. 320-325, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160288.
9. A.P. Zabolotnyi, Yu.V. Daus Formalization of the procedure for connecting sources of distributed generation to electrical networks. // *Bulletin of TDATU "Problems of energy supply and energy saving in the agricultural sector of Ukraine"*. – 2015. – №. 3. – p.37- 41.

Надійшла: 23.05.2024
Received: 23.05.2024

О.В. Коцар¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-7958-2335О.В. Бориченко¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6127-2945В.А. Побігайло¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2673-7329¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ МАРКЕТИНГУ ПІД ЧАС ЗАЛУЧЕННЯ АБІТУРІЄНТІВ ДО ВСТУПУ В УНІВЕРСИТЕТ

Професійна орієнтація абітурієнтів є невід'ємною частиною маркетингової стратегії університетів і країни в цілому з підготовки якісних фахівців для національної економіки. Потенційними абітурієнтами бакалаврату університетів є випускники середніх шкіл та коледжів. В статті наведено досвід залучення випускників шкіл та коледжів до вступу на бакалаврат кафедри електропостачання КПІ ім. Ігоря Сікорського за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 «Електрична інженерія». Бібл. 3.

Ключові слова: абітурієнт, бакалавр, електроенергетика, електрична інженерія, енергетичний менеджмент, енергоефективні технології, освіта.

Вступ.

Якісна підготовка професійних кадрів є невід'ємною умовою успішного сталого функціонування та розвитку країни, а основу професійних кадрів утворює інженерний склад, який відіграє провідну роль у формуванні науково-технічної бази держави і до якого висуваються підвищені вимоги. Чи не найбільшою мірою це стосується енергетичної галузі, об'єкти якої від початку повномасштабної російської агресії піддаються майже безперервним руйнівним повітряним атакам. «Нові реалії змусили додати до стратегії розвитку КПІ ще одне важливе завдання: підвищення обороноздатності держави та започаткування базових засад національного супротиву. В лічені місяці університет активізував наукові розробки та підготовку кадрів за військово-промисловими напрямками, став розробником понад 40 новітніх технологій подвійного і воєнного призначення, шість з яких вже поставлено на озброєння... У роки війни КПІ не лише робить усе можливе для перемоги, а й напрацьовує платформу повоєнної інноваційної трансформації країни, виходячи з обставин, що Україна ймовірно ще довго знаходитиметься в недружньому сусідстві», – зазначив ректор Михайло Захарович Згуровський у вітальній промові на ювілейній сесії професорсько-викладацького складу з нагоди 125-річчя КПІ ім. Ігоря Сікорського [1]. Реалізація нових завдань, серед іншого, вимагає нових підходів до відбору і залучення до вступу до університету потенційних абітурієнтів з числа найбільш підготовлених і мотивованих випускників шкіл та коледжів. Це є найактуальнішим, зокрема, для енергетичної сфери, тому підвищену увагу сьогодні приділяється підготовці інженерних і наукових кадрів в галузі знань «Електрична інженерія».

Метою досліджень є аналіз умов, визначення напрямів і формування базових принципів популяризації, відбору, попередньої підготовки і залучення до вступу на кафедру електропостачання КПІ ім. Ігоря Сікорського абітурієнтів бакалаврату за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 «Електрична інженерія» в сучасних реаліях.

Для досягнення поставленої мети в статті вивчено попередній досвід кафедри, проведено дослідження серед студентів бакалаврату щодо продуктивності маркетингу вищих навчальних закладів (ВНЗ) серед школярів та випускників коледжів, критично проаналізовано отримані результати з точки зору застосування набутого досвіду у сучасних умовах і розроблено рекомендації кафедри щодо проведення вступної компанії.

Матеріал досліджень. Кафедра електропостачання є базуєтворюючою кафедрою навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту (НН ІЕЕ) Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ ім. Ігоря Сікорського) і чи не єдиною кафедрою серед ВНЗ України, яка здійснює наскрізну трирівневу підготовку бакалаврів, магістрів (професійних і науковців) та PhD одночасно за освітньо-професійними програмами (ОПП) «Системи забезпечення споживачів електричною енергією» і «Енергетичний менеджмент та енергоефективність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 «Електрична інженерія». Результатом такого підходу є виховання кваліфікованих фахівців-електроенергетиків, які здатні не лише успішно розв'язувати завдання власної спеціальності, а й ефективно співпрацювати із фахівцями суміжних сфер діяльності, розуміючи їхні потреби та завдання і вмюючи знаходити компроміс під час спільного розв'язання комплексних задач [2]. Зокрема, це є наслідком тривалої кропіткої роботи з популяризації навчання, професійної орієнтації, відбору, попередньої підготовки і залучення до вступу на зазначені ОПП абітурієнтів, яку вже багато років проводять фахівці

кафедри електропостачання серед школярів, учнів позашкільної освіти, зокрема вихованців Київської Малої академії наук (МАН) України та студентів коледжів.

Двостороння співпраця викладачів кафедри електропостачання із учнями-членами МАН України у форматі позашкільної професійно-орієнтованої освіти сприяє формуванню особистості учнів шляхом залучення до наукової діяльності, поєднання у процесі навчання їхніх розумових та творчих здібностей з інструментарієм та освітніми здобутками у різних галузях інженерії. Викладачі кафедри електропостачання організують для учнів заходи, спрямовані на проведення досліджень у різних наукових напрямках за профілем кафедри. Це дозволяє учням поглиблювати свої знання, розвивати аналітичне мислення та навички наукової роботи, а також зрозуміти правильність вибору спеціальності. Слід відзначити такі напрямки двосторонньої співпраці як організація та проведення Днів відкритих дверей НН ІЕЕ, проведення під час шкільних канікул науково-практичних заходів «Інженерні школи ЗВО» (із залученням лабораторної бази кафедри електропостачання), відкриті лекції із залученням стейкхолдерів та роботодавців, участь науково-педагогічних працівників кафедри як членів журі у Всеукраїнських конкурсах-захистах науково-дослідницьких робіт учнів – членів МАН України, що є одним із провідних заходів МАН.

Професійно-орієнтаційні заходи кафедри електропостачання для учнів-членів МАН України охоплюють:

- презентації та демонстрації наукових досягнень і досліджень, що виконуються викладачами;
- можливості брати участь у наукових проєктах або дослідницьких групах як підготовка до участі у Всеукраїнських конкурсах-захистах науково-дослідницьких робіт учнів МАН України;
- інформацію про спеціальності та освітні програми, за якими кафедра готує фахівців;
- організацію екскурсій на різні підприємства, установи та навчально-наукові лабораторії кафедри;
- наукові консультації, підготовчі курси або навіть можливість презентувати свої дослідження перед експертами з університетських наукових колективів.

Науково-педагогічні працівники кафедри електропостачання приймають участь в організації роботи та проведення досліджень у секції екологічно безпечних технологій та ресурсозабезпечення Відділення інженерії та матеріалознавства МАН України. У секції вихованцям МАН України надається унікальна можливість глибоко зануритися в енергетику, екологію та енергозбереження завдяки практичному дослідженню різних напрямків із використанням передового обладнання та ресурсів на базі сучасних лабораторій кафедри. Завдяки активному залученню вихованців МАН України до науково-дослідної роботи, яка передбачає проведення досліджень, написання наукових робіт і участь у конкурсах, учні мають можливість для продовження свого навчання в університетах, включаючи такі етапи та фактори, що сприяють їхньому успішному переходу: підготовка через поглиблене навчання, науково-дослідна робота, співпраця з університетами, участь у конкурсах та олімпіадах, підготовчі курси та програми, отримання стипендій та грантів.

Участь та перемоги в конкурсах і олімпіадах, таких як GENIUS Olympiad, надають учням додаткові переваги при вступі до університетів, оскільки такі досягнення часто враховуються під час зарахування до університету.

Завдяки цим можливостям і підтримці суттєво збільшуються шанси для учнів МАН вступити до університетів і продовжити свою освіту на вищому рівні, використовуючи набуті знання та навички для подальшого наукового і професійного зростання.

Враховуючи те, що професійно-технічна освіта є базовим складником української системи освіти, де здобувач може оволодіти практичними знаннями, уміннями і навичками за певною професією, а саме здобути робітничу кваліфікацію можна в ліцензованих закладах професійної освіти. Серед типів таких закладів, з якими співпрацює кафедра електропостачання НН ІЕЕ, є професійні училища, ліцеї, центри, навчально-курсівні комбінати тощо. Слід відзначити, що важливою перевагою такої співпраці є підготовка майбутніх фахівців за скороченими програмами, які фокусуються виключно на професійній підготовці. Це дозволяє здобувачам швидко набути необхідних компетенцій, умінь і практичних навичок для успішного виходу на ринок праці.

Крім того, така співпраця забезпечує здобувачам можливість навчатися в реальних умовах, що відповідають їхній майбутній професії, наприклад, з проєктування та експлуатації систем забезпечення споживачів електричною енергією або впровадження систем енергетичного менеджменту. Це допомагає підготувати їх до роботи за фахом та збільшує їхні шанси на успішне працевлаштування після завершення навчання.

Таким чином, співпраця кафедри електропостачання з професійними училищами та іншими закладами професійної освіти є важливим кроком у забезпеченні якісної підготовки кадрів для електроенергетики і сприяє успішній інтеграції випускників на ринку праці.

Результати маркетингової активності кафедри електропостачання було проаналізовано під час проведення занять зі студентами обох спеціальностей з дисципліни «Інформація та комунікації на підприємствах електроенергетики». Зазначену дисципліну віднесено до нормативних дисциплін циклу професійної підготовки бакалаврів [3].

В основі підготовки сучасних фахівців-енергетиків лежить формування погляду на електричну мережу в рамках концепції Smart Grid, відповідно до якої одним з головних напрямів розвитку електричної мережі є модернізація бізнес-процесів, що робить розумні мережі рентабельними. Бізнес-рівень архітектурної моделі Smart Grid передбачає вдосконалення інформаційного обміну гравців ринку електричної енергії заради досягнення ними якісно нових бенефітів, зокрема, покращення керованості електроенергетичної системи, підвищення рівня енергоефективності, зменшення витрат на енергетичні ресурси, скорочення використання викопного палива і зниження шкідливого впливу на довкілля тощо. Лібералізація ринків електричної енергії та адаптивне керування процесами її виробітку і споживання на засадах енергоефективності та енергозбереження на тлі широкого інтегрування до електричної мережі розосереджених генерувальних установок на базі альтернативних та відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) є трендами сучасної електроенергетики. За таких умов ефективність ендогенних (зумовлених внутрішніми причинами) та екзогенних (породжених зовнішніми чинниками) комунікацій є невід'ємною умовою результативного функціонування підприємств електроенергетики, що у свою чергу вимагає якісної підготовки фахівців-енергетиків, зокрема, у сфері сучасних інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) [3].

Отже, метою навчальної дисципліни «Інформація та комунікації на підприємствах електроенергетики» є формування у бакалаврів сучасного рівня знань, умінь і навичок у галузі електричної інженерії під час організації служби інформації, планування комунікаційних процесів та впровадження ІКТ на підприємствах енергетики, зокрема електроенергетики. Завданням опанування дисципліни є навчання бакалаврів методам і принципам побудови, функціонування та особливостям застосування систем управління базами даних, створення і використання веб-ресурсів, здійснення пошуку в Інтернет, умінню ефективно взаємодіяти на професійному та соціальному рівні з використанням інформаційних технологій, застосовувати інформаційні технології та програмні засоби під час розв'язання конкретних завдань професійної діяльності, організовувати управління інформацією на базі сучасних інформаційно-комунікаційних технологій, працювати в команді, підтримувати ділову комунікацію у професійній сфері, використовувати одержані знання, уміння та навички для подальшого професійного навчання [3].

Предметом навчальної дисципліни є формування теоретичних знань і практичних навичок з розробки, побудови, впровадження та застосування систем управління базами даних (СУБД) і веб-ресурсів, систем автоматизованого проектування (САПР), системи підтримки прийняття рішень (СППР), експертних систем, CRM та ERP-систем. Це дасть змогу бакалаврам у галузі електричної інженерії використовувати набуті знання для розв'язання професійних задач високої складності, зокрема, організовувати відомчі комунікації та налагоджувати комунікації між рівнями та підрозділами, формувати комунікації в кризових ситуаціях, налагоджувати комунікації з органами влади і профспілками, використовувати отримані знання і практичні навички для технічного забезпечення інформаційно-комунікаційних процесів на підприємствах електроенергетики [3].

Дисципліна розкриває поняття інформаційно-комунікаційних технологій, що спрямовано на досягнення принципово нового рівня організації інформаційних і комунікаційних процесів та їхнього технічного забезпечення на підприємствах електроенергетики. Серед програмних результатів навчання – вміння вибудовувати та налагоджувати ділові комунікації на підприємстві, зокрема, комунікації між рівнями та підрозділами, здійснювати підготовку та організацію комунікації в кризових ситуаціях, вміння організовувати та планувати інформаційні та комунікаційні процеси на сучасному підприємстві, знати і володіти технологіями автоматизації офісу та основами електронного документообігу [3].

В рамках однієї з тем дисципліни, а саме «Комунікації виробничого процесу», студентам було запропоновано поділитися власним досвідом із залучення їх до вступу до КПІ ім. Ігоря Сікорського за вибраною спеціальністю і надати зворотний зв'язок щодо ефективності маркетингу університету. Результати підтвердили правильність вибраної стратегії.

Серед іншого, студенти зазначили:

1. Цільовою аудиторією маркетингу із залучення до вступу до університету мають бути в першу чергу учні 8 – 9 класів, оскільки учні 10, а тим більш випускного 11 класу переважно вже визначилися зі спеціальностями, якими вони хотіли б оволодіти і їх важко перепрофілювати. *«Чому я так думаю? Тому що в 11 класі майже кожна дитина знає напрям (технічний або гуманітарний) та знає університет, до якого мріє поступити. В 10 класі теж більшість знає, куди хоче, і дуже малий відсоток тих, хто це вагається. А от учні 8 – 9 класів ще не визначилися, ким вони хочуть бути і на мою думку саме таким учням потрібно розповідати про різні спеціальності, щоб вони починали вибирати ті, які їм ближче до душі. Бо учня чи ученицю 11 класу, які вже все ухвалили рішення, переконати майже неможливо»*, – написала одна зі студенток бакалаврату групи ОЕ-01 Олена Балан. Майже всі студенти, які прийняли участь в дослідженні, цілком погодилися з цим твердженням.

2. Під час планування зустрічей зі школярами не варто обмежуватися відвідуваннями шкіл. Це тим більш актуально сьогодні, коли багато учнів тимчасово переїхали або покинули Україну з міркувань безпеки і продовжують навчання дистанційно в українських школах або очно за кордоном. Переважним

місцем зустрічі з потенційними абітурієнтами мають стати соціальні мережі. Окрім того, що такий шлях надає можливість охопити більш широку аудиторію, зробити цей процес майже безперервним, додати креативності і застосувати весь потужний інструментарій ІКТ, такий спосіб спілкування добре збігається з очікуваннями молоді, відповідає їхнім потребам, робить процес професійної орієнтації захоплюючим і продуктивним. *«Для того, щоб більшість дізнались про кафедру, інститут, університет, як на мене, потрібно розвивати сторінки в соціальних мережах. На сьогоднішній день молодь переважно проводить майже весь свій час в Інтернет. Можна розповідати про наш інститут в таких соц. мережах як Instagram, Telegram, Facebook (найпопулярніші мережі). Також можна проводити в цих мережах зустрічі, запрошувати випускників для спілкування з абітурієнтами, щоб вони ставили запитання, що саме їх цікавить. Це доволі весело та інформативно»*, – ділиться досвідом Олена Балан.

3. Перед влаштуванням зустрічей варто попередньо провести інформаційну кампанію, зробити розсилку інформаційних матеріалів і здійснити опитування учнів. Таким чином представники ВНЗ зможуть уточнити інформацію про потреби школярів, а школярі матимуть можливість визначитися з тим, які саме зустрічі їм варто відвідати. *«Мені сподобалося, що перед тим, як прийти і надати нам інформацію, спочатку зробили розсилку на email (або письмові листи вже у школі) із заохочувальним опитуванням на тему: "Які напрямки вас цікавлять?" і необов'язковим пунктом було позначення спеціальності, якщо людина вже визначилася. Також були питання на кшталт: "Який напрям навчання у вашому класі?" (у нас у школі були фіз-мат, інфо-тех та хім-біо класи) та "Який предмет вам найбільше подобається?" Таким чином я могла вибрати щось конкретне, що мені подобалося, а не слухати про все»*, – пише студентка групи ОЕ-01 Маргарита Моголат.

Студенти радять креативно підійти до підготовки матеріалів до таких зустрічей, оскільки неякісні інформаційні матеріали або такі, які не відповідають очікуванням учнів, лише зіпсують захід. *«Як все відбувалось? Школярів збирали в актовій залі і розповідали про коледж чи університет близько 2 уроків (1.5 год). Роздавали буклети, дизайн яких був жахливий. Розповідь розпочиналася з того, коли було започатковано коледж або університет і всі дані ніби було взято з вікіпедії. Такі зустрічі за статистикою нічого не давали... А в ІІ класі всі мої однокласники приблизно знали куди хочуть вступати, і не думаю, що такою вступною кампанією їх можна було б переконати»*, – ділиться спогадами інша студентка групи ОН-01 Дана Плотник. *«...мені не подобалося, коли більшість виступу займала історія вузу (саме історія, а не відомі випускники). Важливо розповісти, що чекає на молодь попереду, адже питання майбутнього найважливіше для випускника школи»*, – пише студент групи ОН-01 Іван Чечун. На думку теперішніх вже студентів бакалаврату, інформаційні матеріали, які поширюються серед учнів, мають бути лаконічними, привабливими, креативними і обов'язково, про це зазначили майже всі студенти, містити QR-код з посиланням на більш розгорнуту інформацію. Тоді є шанси, що учень після зустрічі, можливо разом із батьками прочитає детальнішу інформацію про університет, інститут, кафедру. *«...Не хотілося б бачити цілу газету замість брошури, вона має бути невеличкою і, напевне, з деякими QR-кодами з посиланням на більш детальну інформацію. Просто, у разі зацікавленості учень може з легкістю перейти за посиланням і прочитати більше про те, що саме його цікавить»*, – звертає увагу студентка групи ОН-01 Анастасія Євдокимова.

4. Плануванню зустрічі варто приділити особливу увагу, оскільки помилки під час влаштування зустрічі, не врахування інтересів не лише школярів, а й вчителів та адміністрації школи просто зведе нанівець усі зусилля залучити школярів до вступу саме до цього університету. *«Я чітко пам'ятаю, як до ліцею, де я навчалася наприкінці десятого – на початку одинадцятого класу приходили представники двох університетів... А потім дві людини, які пропонували навчання та проживання в якомусь маленькому містечку в Польщі. Можливо через небажання поступати саме в ті ВНЗ, які пропонувалися, я не вважаю роботу, яка проводилася з майбутніми абітурієнтами, ефективною. Можливо, я маю таку думку через низку помітних мінусів, які цілком змінили мою загальну уяву. Сьогодні я можу виділити ряд негативних аспектів, які хотіла б виокремити, маючи такий досвід в минулому. По-перше, мене дуже здивувала неорганізованість обох заходів, чи можливо це було просто халатне ставлення адміністрації і тут варто винуватити лише ліцей. У людей, які вже не першу школу обігнали в пошуках майбутніх студентів, просто не було часу нормально розповісти про університети і можливості, які відкриваються. Перебивання вчителів, які прагнули скоріше закінчити свій урок і взагалі не знали про те, що на їх урок має хтось прийти, були занадто помітними. У такій справі так важливо зробити все організовано. Тому представник університету має впевнитися у тому, що все обговорено і наданого часу для викладення інформації буде достатньо, бо перехід з одного спектру питань на інший, а потім знову повернення до попереднього неймовірно сильно впливає на увагу слухача. Якби я була представником і мене заздалегідь попередили б про певний ліміт в часі, то я б усіма силами намагалася б стисло подати усю необхідну інформацію і нічого не наплутати. Ні від кого я не чула про можливість отримання стипендії та про її розмір, і не розумію чому, бо це ж заохочує майбутнього студента уважніше слухати далі. По-друге, я пам'ятаю, як після того як представники своїми словами намагались щось донести нам, вони залишали на першій парті якісь візитівки з номером телефону або ж флаєри, в надії що хтось після уроку захоче*

підійти і їх взяти. Я б вчинила б по-іншому: стисла презентація, яку приємно дивитись, без води з найголовнішою інформацією – ось варіант набагато кращий. Наразі, майже кожен учень користується смартфоном, який і стане у нагоді. Чому б не зробити QR-код наприкінці презентації з посиланням на відповідні контакти чи подальшу інформацію? Маленькі паперці постійно губляться, тому, на мою думку, такий спосіб поширення подальшої інформації є набагато ефективнішим. Моя сестра наразі навчається у школі і сказала мені те ж саме. Є багато маленьких нюансів, які потім справляють погане враження, тому представник має заздалегідь їх уникнути», – ділиться досвідом студентка групи ОН-01 Олександра Філіппова. «Для кожного, без виключень, стипендія є стимулом навчатися, то ж її сума може зацікавити майбутніх студентів. У студентів нашої спеціальності стипендії більші, то ж цим варто користуватися. Як на мене, це може бути навіть однією з головних переваг нашої спеціальності», – підтверджує слова Олександрів Іван Чечун.

5.Звісно, **зустрічатися** зі школярами варто і досвідченим викладачам університету, які здатні доступно пояснити майбутнім абітурієнтам всі переваги і особливості спеціальності, розповісти про навчальний процес, методiku викладання тощо. Втім, також варто розуміти, що школярі довіряють в першу чергу не поважним викладачам, як би це дивно не звучало, а набагато більше студентам, які навчаються зараз, і випускникам університету, які навчалися раніше і отримали диплом кілька років тому. «Коли викладачі приходили і розповідали, вони не викликали великої довіри, тому що це їхня робота агітувати школярів і щоб більше до них поступали. Я дослухалась переважно до студентів 2-4 курсів. Тому що вони навчалися і могли розповісти про перспективу певної спеціальності та працевлаштування», – ділиться досвідом Олена Балан.

Школярів цікавить, як виглядає навчання в університеті очима студентів, як колишні студенти влаштувалися на роботу, які знання, компетентності, уміння і навички, здобуті в університеті, стали в нагоді в професійній діяльності, який попит на випускників саме за цією спеціальністю, цієї кафедри і саме цього університету, які відгуки від роботодавців, чи довго прийшлося поповнювати знання або перенавчатися після закінчення університету, яка якість викладання в університеті, відгуки про викладачів і ще на багато багато запитань. І в цих питаннях школярі довіряють радше своїм старшим друзям, ніж викладачам. «Щоб покращити профорієнтаційну роботу в школі, я би порекомендував також залучати студентів до таких заходів. Адже це найкращий спосіб отримати достовірну інформацію про ВНЗ, який сподобався абітурієнту. Окремо можна уточнити, чим їм подобається і не подобається навчання в університеті. Подібне спілкування може розкрити як несподівані плюси, про які навіть не замислювалися майбутні абітурієнти, так і мінуси, про які ніколи не розкажуть ані буклети, ані спікери. Також, до програми профорієнтаційних заходів я долучив би проведення популяризаційних або вступних лекцій, майстер-класів тощо. Це на мою думку дозволить як найкраще прийняти рішення про вибір фаху та подання документів на навчання за вибраною спеціальністю», – радить студент групи ОН-01 Олександр Топало. «Поспілкувався з молодшим товаришем, що зараз навчається у 9 класі. У майбутньому він бачить навчання з практичної точки зору... Молодь цікавить навчання руками, не лише головою. Рекламувати себе можна практичними заняттями. У КПІ ім. Ігоря Сікорського багато лабораторій на будь-який колір та смак. Варто презентувати найсучасніші з них на фото», – пропонує Іван Чечун. «Також мені подобалося, коли приходили активні студенти (старости, студентські куратори, активісти, профорги), які знали відповіді на нюанси вступної кампанії, які могли розповісти, що конкретно вони вивчають і ким після закінчення університету можна стати. Є великий сенс запрошувати випускників, які деякий час назад закінчили університет і працюють за набутою спеціальністю, оскільки вони можуть поділитися особистим досвідом та розповісти багато цікавих історій», – ділиться спогадами Маргарита Могилат. «Я вважаю, що представником університету має бути студент, адже є більше вірогідності, що він насправді розповість, як відбувається навчання. Цей студент має бути соціальним, впевненим і дружжелюбним, бо саме таких людей буде цікаво слухати», – зазначає студентка групи ОН-01 Анастасія Євдокимова. Інша студентка групи ОН-01 Марія Рак буквально підтвердила думку Анастасії: «Наступною проблемою був вибір факультету: ФЕА чи НН ІЕЕ? І тут головну роль відіграв Андрій Горобець (голова студентської ради НН ІЕЕ), наш голова усієї активності факультету. Він одразу ж відповів на моє повідомлення, розпитав про мету вступу, розповів про життя у гуртожитку, про заходи, викладачів та навчальний процес, допоміг проаналізувати усі переваги та недоліки, показав основні проблеми конкурентного факультету. То ж можна сказати, що я надала перевагу НН ІЕЕ лише завдяки Андрію».

Студенти також визначають як позитивний той факт, якщо старший брат, сестра, кузен, друг навчаються або закінчили той самий університет за тією самою спеціальністю. Досвід родичів або близької людини переконає школяра набагато сильніше і скоріше, ніж доводи викладачів. «Чи вплинуло на Ваше рішення поступити до КПІ ім. Ігоря Сікорського? Ні, а ж ніяк не вплинуло, бо давно знала та хотіла саме в КПІ. Адже для мене цей університет схожий на Ватикан у Римі. Має свій медичний заклад, спорткомплекс, бібліотеку, культурний центр, парк, пам'ятники, музеї та інше. Чи вплинуло на вибір Вами спеціальності? Теж ні. На вибір вплинули мої результати ЗНО та рідні. Тому рішення було – енергетика, бо половина родини причетна до неї. З часом і сама переконалася у своєму виборі. Щоб Ви

порадили для підвищення ефективності таких заходів? У сучасному світі не думаю, що саме таке поширення та рекламування навчального закладу або спеціальності є доречним та ефективним. Існує багато інструментів та платформ для цього. Розвиваючи соц. мережі та рівень забезпечення студентів та викладачів збільшиться інтерес абітурієнтів, які прагнуть відвідати день відкритих дверей та в подальшому вступити. Цей інтерес підвищить рейтинг навчального закладу та актуальності серед інших», – стверджує студентка групи ОЕ-01 Анастасія Хоренко. «Щодо навчання в КПІ ім. Ігоря Сікорського, то на мене вплинули мої сестри та брати, які навчались тут, деякі з них на цій спеціальності. Зараз вони дуже успішні, тому я намагаюсь рівнятися на них, адже вважаю їх досвідченими та ґрудованими людьми», – стверджує цю саму думку студентка групи ОН-01 Христина Сіваченко, яка розкрила зворушливу історію власного шляху до НН ІЕЕ: «Я навчалась в маленькій школі на Миколаївщині і до нас інколи не доїжджають автобуси, не те що представники визначних вузів та університетів. Тому з агітацією в моєму навчальному закладі завжди були проблеми... Все розпочалося з дев'ятого класу, коли до нас на перерві зайшли представники районного ліцею з метою провести агітацію серед нас впродовж перерви, а саме за десять хвилин після контрольної роботи з математики. В той момент я прагнула тільки відпочинку, а не слухати незнайомих людей, які давали приміряти спецодяг для різних професій. І як ви вже зрозуміли, він був не в найкращому стані... Вони роздали нам візитівки з календарем і пішли. Згодом у нас проходили подібні заходи, але всі вони були такі ж самі, на перерві з візитівками. Одного разу, в десятому класі нас повезли до Миколаївського аграрного університету. Я була захоплена, адже мені завжди подобалось місто, його краса та ритм життя. Я очікувала креативного та наукового підходу до заохочення нас до навчання в цьому закладі. Але мої сподівання провалились буквально через одну хвилину. Після прибуття до пункту призначення, на вході нас ніхто не зустрів. Мало того, ми були вимушені чекати хвилин двадцять організаторів цього заходу. Після довгої дороги ми були зморені і замість того, щоб запропонувати нам пляшку води, нас повели до величезного задушливого залу, де була ще сотня таких абітурієнтів, таких самих як ми. Нас жодним чином не мотивували, а просто сказали, що ми майбутні аграрії і що крім нас більше нема на кого залишити наші землі. Моєму обуренню не було меж. Такий собі маркетинг. Єдина агітація, до якої я б хотіла повернутись – це поїздка на Південноукраїнську атомну електростанцію. Це було вражаюче. З працею на ПУАЕС пов'язала життя майже вся моя родина. Я була там не один раз і завжди захоплювалась. Чи то там було так красиво з точки зору інженера, чи то моя тітка була дуже освіченою і показувала та розповідала мені все те, що не кожному вдається побачити та почути. Повернемось до нашої поїздки на електростанцію. Спочатку нам показали четвертий енергоблок, не просто збоку, а з середини. Він був недобудований, тому ми отримали дозвіл там побувати. Нас доручили трьом інженерам, які працюють в реальних умовах на діючих енергоблоках. Вони розповідали нам, який це сектор управління та за що він відповідає. Мене вражало кожне слово. Далі нас повезли на гідроелектростанцію. Розповіли та показали всі кроки виробітку електроенергії від напору води. Дуже чудово спонукали до подальшої роботи на станції. Нам розповідали, що кожна людина є дуже важливою на тому чи іншому процесі, що кожен інженер, контролер та електрик – це немов гвинтик у великому механізмі, що від кожного залежить чи буде освітлюватись твоя будинок завтра».

Ще однієї поширеної помилки під час проведення зустрічей з потенційними абітурієнтами студенти радять уникати, а саме, просування під час заходу виключно власної кафедри. Адже в очах школярів викладач або студент перед ними в першу чергу є представником університету і має в першу чергу просувати рідний університет. «На мою думку, значним недоліком таких зустрічей, є те, що у таких випадках представники кафедри розповідають суто про діяльність кафедри, а при появі питань від випускників стосовно інших напрямків підготовки навчального закладу неспроможні кваліфіковано відповісти на запитання. Таким чином, представники залишають поза увагою випускників, потенційних для свого навчального закладу, яких вони не змогли зацікавити під час зустрічі... Найбільшою проблемою проведення маркетингових заходів є те, що вони виконуються в межах одного закладу точково, різними відділами, які не пов'язані між собою, без встановленої єдиної ідеї та єдиної стратегії», – звертає увагу студентка групи ОН-01 Світлана Ярошук.

«Що треба щоб зацікавити людину поступити до себе. Для цього потрібно дотримуватись декількох критеріїв: 1. Представник(агітатор) повинен бути до 40 років. Повинен впевнено розповідати про спеціальність або університет який він представляє, це повинно займати 10-15 хвилин. Він повинен розповісти простими словами про спеціальності та ким людина може бути, якщо вирішить посвятити цьому своє життя (саме може а не буде). Після своєї розповіді він має простими словами відповідати на запитання (але без води) на це 5-10 хвилин залежить від кількості (якщо запитань немає агітатор не впорався). 2. Запрошення та проведення «Днів відкритих дверей», де людина яка зацікавилась може познайомитись зі студентами поспілкуватись та вже буде вирішувати хоче він поступати або ні. 3. Анонімний чат, люди бувають різні, вони можуть вважати що їх питання не ті які повинен ставити. Людина дуже соромиться коли каже від свого лиця. Дайте йому маску і він скаже він правду. В нашому варіанті задасть питання то ж це важливий пункт який всі ігнорують. 4. сторінки в соціальних мережах,

зараз вся молодь сидить в соціальних мережах, то треба це використовувати, створити сторінку в YouTube та викладати життя університету (Правду! Бо абітурієнт буде не задоволений якщо на відео одне в житті інше). Чат абітурієнтів аби люди могли познайомитись та дізнатись один про одного. Та мабуть сторінку в Instagram бо люди сидять там набагато більше.» – підсумовує досвідченіший студент групи ОН-п01, випускник коледжу Даниїл Резніченко.

6. День відкритих дверей. «Мене, як абітурієнта, не зацікавив ані один факультет, оскільки я бачив лише місце, де я буду навчатись, а не головну мету набуття освіти – перспективу отримати висококваліфіковану роботу. Було б добре, якщо б власне роботодавці займалися профорієнтацією абітурієнтів. У них більше ресурсів та можливостей для демонстрації сфери діяльності... Замість «Дня відкритих дверей» запросити абітурієнтів на «Ніч відкритих дверей». Залучити компанії, які зацікавлені в кваліфікованих кадрах. Вимикати світло в деяких районах, показати обладнання, спецтранспорт, спецформу, креслення об'єктів та всього того що так не відоме але дуже цікаве. Цим можна показати всю необхідність та красу спеціальностей, за якими здійснюється підготовка студентів в ІЕЕ», – креативить студент групи ОЕ-01 Таха Юсоф Муаяд. «Також ми відвідували навчальний заклад, де нас розмістили у великій аудиторії і розповідали про університет, його спеціальності, умови та етапи вступу, переваги, досягнення. На мою думку, для випускників було б цікавіше, щоб була проведена екскурсія університетом, доречно було б відвідування лабораторій закладу, де можна було б зібрати стенд, поставити досліди», – пропонує Світлана Ярошук.

7. Довузівська підготовка безумовно є ефективним ресурсом університетів для залучення і підготовки до вступу потенційних абітурієнтів. «Два роки я відвідував факультет довузівської підготовки від КПІ ім. Ігоря Сікорського, щоб покращити знання з фізики та математики. Досвідченість та професіоналізм викладача спрямували мій вибір в бік інженерних спеціальностей. Склавши ЗНО, я обрав навчання в КПІ ім. Ігоря Сікорського», – розповідає Олександр Топало.

8. Підвищену увагу школярі приймають web-ресурсам кафедри і університету та їхньої присутності в соціальних мережах. До того ж відмічають, що інформація має постійно оновлюватися, інакше в цьому немає сенсу. «Написати пост, наприклад, розповіді від випускників та студентів старших курсів, про їхні можливості працевлаштування та фото, чим вони займаються», – радить Олена Балан. Це набагато сильніше і швидше переконає школярів вступати на цю спеціальність, ніж нудні «спічі» професорів про перспективність вибраного напрямку. «Якщо говорити про сайти і студентські гайди в Інтернет – то це дуже гарно, коли вони є, бо коли я тільки-но почала вивчати спеціальність спочатку я натрапила саме на офіційні сайти та гайди від студентів зі статистиками та відгуками, а вже потім на інші. Але є нюанси – сайти і гайди варто було б оновити актуальною інформацією, бо є моменти, де багато що змінилось. Наприклад, інформацією про сам факультет, про спеціальності та виділити те, що на спеціальностях є багато напрямків. Також додати більше відгуків від студентів, які зараз навчаються на спеціальності. Ще на сайтах потрібно правильно подавати інформацію, говорити про всі тонкощі (наприклад, які предмети потрібні для здачі ЗНО саме на ці напрямки, які документи брати при зарахуванні вже на факультет, які документи та довідки брати при заселенні в гуртожиток) і виділяти точні дати всіх подій», – пропонує Маргарита Могилат. «Якби зараз мені довелося проводити агітаційну кампанію для школярів, я, по-перше, не радила б проводити такі агітаційні заходи після уроків – учні хочуть додому, вони стомлені і зовсім не раді таким гостям. Але ж і навчальний час також не можна забирати. Тому мені здається, що тут у нагоді були б соціальні мережі. Це також було великою проблемою, оскільки я не знала куди звернутися зі своїми питаннями: телефон приймальної комісії був увесь час зайнятий, їздити до університету далеко, та й реальних студентів, які розкажуть правду, навряд чи зустрінеш. А от якби я зайшла б, наприклад, в Instagram, і побачила б, наприклад, гарно розвинену сторінку факультету, де були б зафільмовані певні події з життя студентів – мені було б легше. Я знаю, що деякі університети так роблять, так само як і знаю про сайт НН ІЕЕ, але ж це тільки суха офіційна інформація, де зворотній зв'язок бажася кращого (саме під час вступної кампанії; я розумію, що відповідальним особам просто не вистачало часу, тож це не їх провина). Також я би в жодному разі не тиснула б на потенційних абітурієнтів, оскільки вони це не визначилися, і не можна брати на себе відповідальність за їхнє майбутнє. Загалом, треба розуміти реалії школярів, згадати себе в їхньому віці та подумати, що було б актуально для вас. Це і є ключ до успішного зацікавлення абітурієнтів, на мою скромну думку», – стверджує Марія Рак.

Христини Сіваченко ділиться власним баченням ефективної агітаційної кампанії:

«Хороша агітація. Якою ж все ж таки вона має бути?»

Запорукою будь якого успіху в цьому є комунікація. Важливо спілкуватись з представниками цих заходів «віч на віч», а не через візитівки. Цими особами мають бути кваліфіковані студенти або викладачі, які можуть відповідати на провокативні запитання абітурієнтів, а не просто студенти, в яких є вільний час пороздавати флаєри. Ще з шкільних років нам обіцяють, що ті формули, які ми вчимо, знадобляться в нашому подальшому житті. Але ж ніхто не пояснює, як саме. Тому дуже важливо знати про те, чому нас будуть навчати, яку це користь принесе суспільству та нам і яка наша частка в цьому.

Важливо чітко продумати план спілкування з абітурієнтами та їхнім залученням до розмови. В моєму випадку, розповідали стисло про заклад і запитували в нас, чи маємо ми запитання. А ми навіть не знали що спитати, адже тієї інформації, що вони нам надали, було геть недостатньо, та й часу на запитання було обмаль. І в кращому випадку вони просто йшли, а в гіршому наступала мовчанка, що призводила до зняжковілості. Виникав психологічний бар'єр.

Авторитет візитерів також вносить свою частку в запоруку хорошої комунікації. Адже, якщо університет нам буде представляти недисциплінований, незібраний студент, який не розуміє, яким буде його подальше майбутнє після завершення навчання, то абітурієнти не віднесуться серйозно до його промови. Протилежністю цьому має бути розповідь успішного студента, який вже закінчив цей ВНЗ і працює за спеціальністю. Той, хто може розповісти, чому саме цей заклад необхідний нам для будування свого майбутнього життя та подальшої кар'єри.

Для нас дуже важливо, як саме відбувається студентське життя, а саме зранку та до вечора. Адже ще сьогодні ходять чутки про погані стани гуртожитків. Якщо цей заклад справді хороший і гуртожиток облаштовано належним чином, то на мою думку приховувати нічого. Я вважаю, необхідно знімати короткі ролики про студентське життя та показувати школярам.

Дуже важливе місце займають можливості, а саме практика та робота під час навчання. Підписання контракту університету з провідними організаціями про можливість проходження практики з можливістю отримання належної заробітної плати. Прикладом слугує підписання договору КПІ ім. Ігоря Сікорського з компанією ДТЕК.

Зоровий контакт займає чинне місце в агітації. Необхідно показувати корпуси, аудиторії та лабораторії університету. Для того щоб майбутні студенти знали, що буде супроводжувати всі їхні роки навчання в цьому місці».

Тож, підсумовуючи Дана Плотник рекомендує:

–чіткі стислі факти, які могли б зацікавити саме школяра, а не науковця чи викладача, використання простих зрозумілих слів;

–брошура (буклет) має бути обов'язково, але виконано в сучасному стилі, мінімально тексту, більше фото, яскравих, фото студентів і т.і., де можна було б знайти інформацію не лише про університет, але й інтерактив і університетські гуртки;

–лайфхаки (поради), що насправді нас чекатиме в університеті. Приклад: «Так, на вас чекатимуть сесії, але у вас будуть компетентні викладачі, які підтримають завжди, нададуть усі необхідні пояснення та докладуть зусиль, аби ви зрозуміли, також будуть студкуратори, які на власному досвіді розкажуть, як скласти іспит, чого прагне викладач, та як найкращим чином засвоїти матеріал»;

–відитовхуючись від спеціальності, про яку хочуть розповісти, обов'язково продумати практичну частину, аби школярі могли наочно усе побачити та зацікавитись. Це може бути ігрова форма але повчального характеру і т.і. Адже технології не стоять на місці і потрібно «йти в ногу з часом» разом з молодим поколінням.

–виступ має бути стислим, змістовним (без води), 10-15 хв., а решту часу (30 хв.) відвести на практичну частину, наочну скажімо. І усього це забере лише один урок, але з користю для учнів;

–звичайно, відповіді на запитання також стислі, чіткі, лише на поставлене запитання;

–має бути правильно вибраний час: з самого ранку учні ще думками в ліжку, а останні уроки, думками вдома. Тому найоптимальніший час – з 10:00 по 12:00 годину;

–також не мени важливим є настрій представників: якщо вони втомлені, бо це вже по рахунку п'ята чи шоста школа, то і учні це бачать й інформація вже сприймається не так.

Це мої такі поради лише як від школярки в минулому, без якихось складних порад, бо вступна кампанія, я вважаю це також велика робота, і ми не усе можемо знати, що за нею приховується».

Проведені дослідження доводять, що профорієнтаційна робота університету є важливим елементом у системі вищої освіти і сприяє правильному вибору професії потенційними здобувачами та підвищенню якості підготовки майбутніх фахівців. З метою підвищення ефективності основні аспекти профорієнтаційної роботи університету повинні охоплювати такі напрями:

–інформаційно-просвітницька діяльність (організація Днів відкритих дверей, інформаційні кампанії, використовуючи соціальні мережі, веб-сайти, рекламні матеріали для поширення інформації про університет, його програми та досягнення);

–проведення індивідуальних та групових консультацій для учнів шкіл з метою допомогти їм визначитися з майбутньою професією та обрати відповідну спеціальність;

–співпраця з школами, технікумами та коледжами (створення партнерських програм, навчальних проєктів, проведення майстер-класів та лекцій тощо);

–проведення підготовчих курсів для старшокласників, які допомагають їм підготуватися до вступних іспитів і національного мультипредметного тесту (НМТ);

–залучення до науково-дослідницької роботи учнів МАН України;

–залучення роботодавців до проведення лекцій та презентацій, які надають вступникам уявлення про ринок праці та їхнє майбутнє працевлаштування.

Завдяки комплексному підходу до профорієнтаційної роботи, університети допомагають вступникам не лише правильно обрати професію, але й мотивують успішно навчатися, щоб в подальшому реалізувати себе на ринку праці після закінчення навчання.

Висновки. Наскрізна трирівнева підготовка на кафедрі електропостачання КПІ ім. Ігоря Сікорського бакалаврів, магістрів (професійних і науковців) та PhD упродовж 25 років за освітньо-професійними програмами «Системи забезпечення споживачів електричною енергією» і «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в галузі знань 14 «Електрична інженерія» дозволила забезпечити промислові, енергетичні, комунальні, комерційні та інші компанії і організації, а також органи влади і місцевого самоврядування України кваліфікованими фахівцями з електропостачання міст, промислових підприємств і об'єктів сільського господарства та енергетичного менеджменту, здатними спільно розв'язувати комплексні завдання з надійного електропостачання споживачів якісною електричною енергією з впровадженням енергоефективних технологій, скорочення використання викопного палива і зменшення шкідливих викидів на засадах сталого розвитку. В основі успішної підготовки та виховання фахівців-електроенергетиків лежить кропітка робота з аналізу умов, визначення напрямів і формування базових принципів популяризації, відбору і залучення до вступу на кафедру електропостачання КПІ ім. Ігоря Сікорського абітурієнтів бакалаврату за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 «Електрична інженерія» з числа найбільш підготовлених та вмотивованих випускників шкіл та коледжів.

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

O. Borychenko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6127-2945

V. Pobigaylo¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2673-7329

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

MARKETING PERFORMANCE INCREASING WHILE INVOLVING APPLICANTS TO ADMISSION TO THE UNIVERSITY

The professional orientation of applicants is an integral part of the marketing strategy of the universities and the state as a whole to train high-quality specialists for the national economy. The schools and colleges graduates are potential university bachelor's degree applicants. The article presents the experience of involving graduates of schools and colleges for admission to the bachelor's degree at the power supply department of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, specialty 141 "Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics" branch of knowledge 14 "Electrical engineering". References 3.

Keywords: bachelor's degree, education, electrical engineering, electrical energy, electrical engineering, energy management, energy-efficient technologies, graduate student, master's degree, power supply systems.

References

1. Mykhailo Zgurovsky “KPI-125: Thinking about the past, we think about the next!” Welcome speech at the jubilee session of the professors staff on the occasion of the 125th anniversary of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute on September 31, 2023 // *Kyiv Polytechnic*, 2023 – No. 29-30. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=MKOx-z24mCY> (accessed at 09.09.2023). (Ukr)

2. Volodymyr Popov, Oleg Kotsar, Vadym Tkachenko and other (2022) The comprehensive training of specialists in the field of electrical engineering at the Power Supply Department of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute // *Energy: economics, technologies, ecology*, No.3, p.p. 31–37. URL: <http://energy.kpi.ua/article/view/271482> (accessed at 09.09.2023). (Ukr)

3. Information and communications at the electric power enterprises. Syllabus // Compiled by the associate professor of the power supply department, candidate. technical of Sciences, by Associate Professor O.V. Kotsar, approved by the Power Supply Department, protocol No.21 of June 7, 2023, approved by the Methodological Council of IEE, protocol No. 9 of June 22, 2023. URL: https://drive.google.com/file/d/17zoDEooyDds-YQ_GfoR-4PV5bvjqQuLh/view (accessed at 09.09.2023). (Ukr)

Надійшла: 31.05.2024

Received: 31.05.2024

ВИКОРИСТАННЯ АМІАЧНОГО ПАЛИВА ЯК ЗАХІД ЗІ ЗНИЖЕННЯ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

У представленій роботі висвітлено можливості використання аміаку як альтернативного палива з метою досягнення низьковуглецевого розвитку держави та посилення боротьби з парниковими газами. З часів промислової революції спалювання було основним методом перетворення енергії для людської діяльності, включаючи виробництво електроенергії та транспорт. На сьогоднішній день ці сектори продовжують значною мірою покладатися на вуглеводневе паливо. Як наслідок, найбільший абсолютний приріст викидів вуглекислого газу у 2022 році був від виробництва електричної та теплової енергії. При збільшенні глобального попиту на електроенергію на 2,7%, викиди в енергетичному секторі зросли на 1,8% (або 261 Мт), досягнувши історичного максимуму в 14,6 Гт. Таким чином, значна частина викидів CO₂ виробляється через ці сектори, що є головним винуватцем глобального потепління, підриваючи боротьбу зі зміною клімату. Необхідність декарбонізації враховується програмними документами, у тому числі державними стратегіями, які не лише застерігають, а й забороняють надмірне утворення забруднюючих речовин та стимулюють популяризацію безвуглецевих технологій в енергетичних секторах. Загальновідомо, що інноваційний розвиток технологій спалювання палива необхідний для досягнення майбутніх цілей вуглецево-нейтральної системи. Незважаючи на докладені значні зусилля для зменшення викидів парникових газів при спалюванні вуглеводнів, наприклад, шляхом підвищення ефективності згоряння, цього недостатньо для досягнення низьких викидів парникових газів. Проведено аналіз досягнень у цій галузі та з'ясовано, що аміаку приділяється все більша увага як одному з найпривабливіших енергоносіїв через його безвуглецеву природу. Однак використання аміаку при спалюванні не позбавлене проблем, включаючи низьку швидкість полум'я, вузькі межі займистості, схильність до утворення NO_x. Таким чином, подальше впровадження аміаку в якості палива в енергетиці та промисловості потребує проведення комплексних досліджень робочого процесу горіння. Дослідження мають ґрунтуватися на визначенні впливу основних технологічних факторів, можливості застосування сумішевих палив, а також встановлення оптимальних геометричних та режимних параметрів паливоспалювальної системи.

Ключові слова: парникові гази, безвуглецеве паливо, аміак, декарбонізація, спільне спалювання аміаку, вуглекислий газ, оксиди азоту.

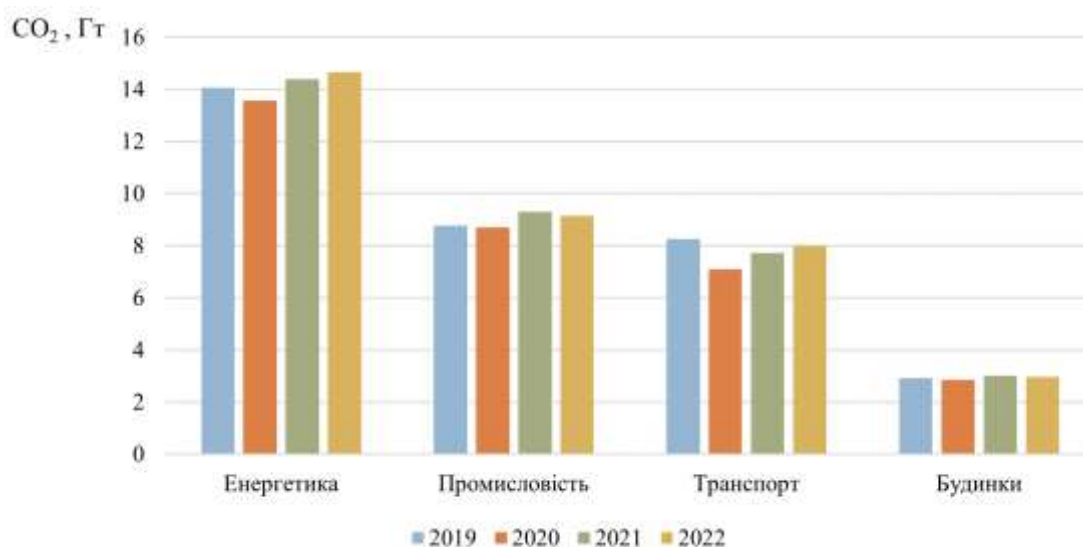
Вступ

З часів промислової революції спалювання було основним методом перетворення енергії для людської діяльності, включаючи виробництво електроенергії та транспорт. На сьогоднішній день ці сектори продовжують значною мірою покладатися на вуглеводневе паливо [1]. Таким чином, значна частина викидів вуглекислого газу (CO₂) виробляється через ці сектори, що є головним винуватцем глобального потепління, підриваючи боротьбу зі зміною клімату.

Найбільший абсолютний приріст викидів CO₂ у 2022 році був від виробництва електричної та теплової енергії [2]. При збільшенні глобального попиту на електроенергію на 2,7%, викиди в енергетичному секторі зросли на 1,8% (або 261 Мт), досягнувши історичного максимуму в 14,6 Гт (рис. 1). Перехід з газу на вугілля в багатьох регіонах був головною рушійною силою цього зростання: викиди CO₂ від вугільної генерації електроенергії зросли на 2,1%.

Загальновідомо, що інноваційний розвиток технологій спалювання палива необхідний для досягнення майбутніх цілей вуглецево-нейтральної системи. Водночас інновації в галузі перетворення енергії просуваються швидше, ніж у минулому, і для підтримки цих технологій необхідні суттєві науково-дослідні роботи.

Незважаючи на те, що значні зусилля були розширені для зменшення викидів парникових газів, наприклад, шляхом підвищення ефективності згоряння, цих зусиль недостатньо для досягнення низьких викидів парникових газів [3]. Декарбонізація основних процесів у промисловому та енергетичному секторі видається важливим рушієм для подолання назрілої проблеми та виконання екологічних зобов'язань щодо викидів парникових газів.

Рисунок 1 – Глобальні викиди CO₂ за секторами, 2019-2022 [2]

Декарбонізація промисловості призводить до поступового скорочення споживання вуглецю та його заміни іншими видами. Програмним документом, який враховує необхідність декарбонізації, є нова Енергетична стратегія України на період до 2050 року [4], згідно якої енергетичний сектор має бути максимально наближений до кліматичної нейтральності.

Енергетичний перехід і досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року вимагає структурних змін і трансформації цілих сегментів економіки. Майбутнє безвуглецеве виробництво електроенергії залежить, головним чином, від використання відновлюваних, низьковуглецевих або безвуглецевих видів палива, які можуть задовольнити збільшення потреби в енергії, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище [5]. Потреба в декарбонізації робить вкрай важливим пошук нових методів використання хімічних речовин, таких як аміак, які можна використовувати без викидів CO₂.

Аміаку (NH₃) приділяється все більша увага як одному з найпривабливіших енергоносіїв через його безвуглецеву природу та створену надійну інфраструктуру для його зберігання та розподілу.

Спочатку аміак розглядався як носій і постачальник водневої енергії, лінія подачі в цьому контексті включає його розкладання на водень і азот в точці доставки [6]. Однак в останні кілька років використання аміаку тепер включає його безпосереднє використання в якості палива [3, 5, 6]. Переосмислення ролі аміаку, зокрема в енергетичному секторі, стало одним із світових трендів.

Аміак має здатність горіти і, оскільки молекула NH₃ не містить вуглецю, горить без викидів CO₂, таким чином відновлюючи інтерес до аміаку з точки зору енергоресурсу. Це можна побачити зі стрімкого збільшення наукових публікацій, пов'язаних із спалюванням аміаку, після оглядової статті Hideaki Kobayashi та ін. [3].

Зокрема, описується дорожня карта до економіки на основі аміаку в працях Natalia Morlanés та ін. [5], де технології застосування аміаку розглядаються з акцентом на поточні обмеження та останні досягнення. Douglas MacFarlane та ін. [6] передбачають виробництво відновлюваного аміаку в масштабах, які є значними з точки зору глобального використання викопного палива. Крім того, у вітчизняній літературі вагомий внесок стосовно аміаку як безвуглецевого майбутнього України зроблено Інститутом теплоенергетичних технологій. Одне з досліджень присвячено особливостям виробництва зеленого аміаку для України [7], де наводиться зелений енергетичний перехід, що передбачає низку енергетичних трансформацій, включаючи декарбонізацію, а також здійснено оцінку необхідної кількості енергії для виробництва зеленого аміаку.

Мета та завдання

Головним завданням даної роботи є висвітлення можливості використання аміаку як альтернативного палива, у тому числі для забезпечення потреб муніципальної енергетики, з метою досягнення низьковуглецевого розвитку держави та посилення боротьби з парниковими газами.

Матеріал і результати дослідження

Аміак є важливим вектором енергетичної безпеки під час декарбонізації різних енергетичних секторів кінцевих споживачів.

Хоча технології виробництва та транспортування аміаку добре відомі, наукова спільнота з проблем горіння постійно досліджує невикористані рішення щодо бар'єрів аміаку для його прямого спалювання.

Спалювання аміаку ускладнене, головним чином через його низьку реакційну здатність, але при цьому утворюється азот і вода:



Низька реакційна здатність пояснюється низькою швидкістю горіння ламінарного полум'я, температурою полум'я та межею займистості порівняно зі звичайним вуглеводневим паливом.

Аміак має дуже різні характеристики горіння порівняно з іншими видами палива, і важливо розуміти, чим вони відрізняються від метану чи водню. Для порівняння у таблиці 1 наведено теплові властивості та основні характеристики горіння аміаку та інших газоподібних видів палива [3].

Таблиця 1 – Термодинамічні характеристики аміаку та інших вуглеводневих палив [3]

Паливо	NH ₃	H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈
Нижча теплотворна здатність, МДж/кг	18.6	120	50	46.4
Межа займистості (коефіцієнт надлишку палива)	0.63-1.4	0.10-7.1	0.50-1.7	0.51-2.5
Адіабатична температура полум'я, °C	1800	2110	1950	2000
Максимальна швидкість ламінарного горіння, м/с	0.07	2.91	0.37	0.43
Мінімальна температура самозаймання, °C	650	520	630	450

Як показано, теплотворна здатність і максимальна швидкість ламінарного горіння чистого аміачно-повітряного полум'я дуже низькі порівняно з типовим вуглеводневим паливом. Через відсутність CO₂ в продуктах згорання аміаку, тепловіддача випромінюванням і температура факелу низькі відносно вуглеводневого полум'я.

У галузі виробництва електричної і теплової енергії вивчаються характеристики горіння аміаку та його застосування в газових турбінах і вугільних котлах.

Дослідницькій групі в Японії вдалося створити газотурбінну установку потужністю 41,8 кВт, використовуючи аміак у якості основного палива [8]. Були проведені дослідно-конструкторські роботи над газовою турбіною, ремонтні роботи постачання аміаку та демонстраційне випробування виробництва електроенергії з використанням аміачного палива. Основними цілями ефективності було збереження сумісності з існуючою системою виробництва електроенергії та мінімізація викидів оксидів азоту (NO_x).

У газовій турбіні починали зі спалювання гасу (рис. 2) [8], збільшуючи виробіток електроенергії і досягнувши стабільної потужності, подавали газоподібний аміак з поступово зростаючою витратою. Вихідну потужність 41,8 кВт було досягнуто за рахунок спалювання чистого NH₃. Водночас подача аміаку різко збільшує NO_x у вихлопних газах порівняно з чистим метаном. Хоча концентрація NO_x у вихлопних газах від спалювання аміаку перевищувала 500 ppm, як показано на рисунку 2, обладнання для видалення NO_x – селективне каталітичне відновлення (СКВ) – може знизити концентрацію NO_x нижче 10 ppm.

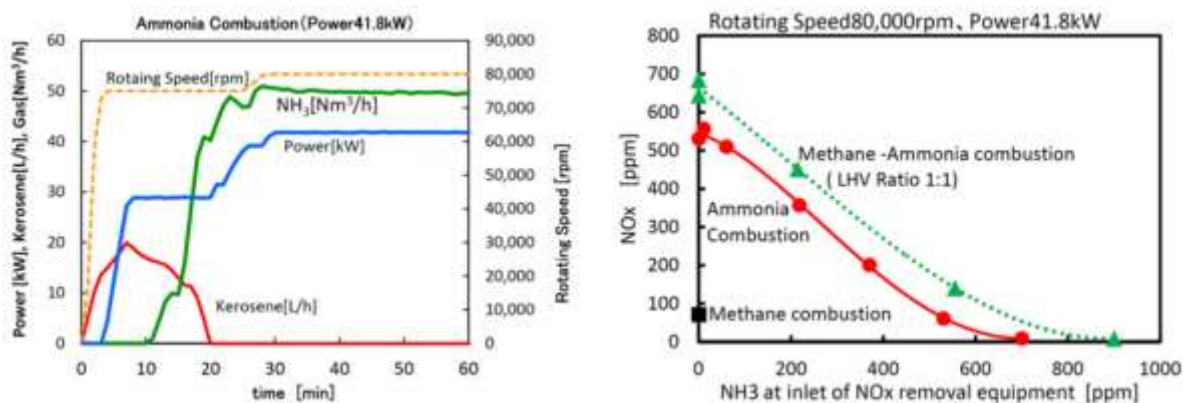


Рисунок 2 – Вихідна потужність 41,8 кВт і викиди NO_x під час спалювання NH₃ у газовій турбіні [8]

Спалювання чистого аміаку супроводжується нижчими викидами NO_x , ніж спільне спалювання метану з аміаком [8], що дозволяє розглядати можливість зменшення емісій оксидів шляхом вдосконалення конструкції пальника.

Крім цього, вченими проводилися експерименти на випробувальному стенді мікрогазової турбіни в Інституті відновлюваної енергетики Фукусіми [9]. Ними було проведено дослідження спалювання рідкого аміаку шляхом його прямого розпилення в камеру згорання.

Однак, через відмінності у властивостях горіння аміаку відносно вуглеводню, можуть знадобитися певні модифікації. Незважаючи на численні переваги, аміак має кілька бар'єрів і прогалін у дослідженнях, які необхідно подолати, перш ніж його використовувати в пристроях для спалювання. Ці обмеження полягають у наступному: 1) низька якість запалювання (октанове число ~ 130) [10], 2) низька швидкість горіння, 3) вузькі межі займистості (16-25 % за об'ємом у повітрі) та 4) високі викиди оксидів азоту.

Зважаючи на окреслені проблеми, наявних досягнень недостатньо та потрібні розробки, які пом'якшують перешкоди для ефективного та успішного прямого спалювання аміаку.

Розробляються великі газові турбіни класу МВт. На відміну від систем малого та середнього розміру, очікується, що великі газові турбіни матимуть суворіші обмеження щодо розміру камери згорання для повного згорання аміаку та складніший контроль NO_x в умовах високотемпературного горіння. Компанія Mitsubishi Power оголосила про початок розробки аміачної газової турбіни потужністю 40 МВт у березні 2021 року та має на меті вивести її на комерційне виробництво у 2025 році після проходження робочих процесів горіння та відповідних випробувань [11]. Знову ж таки, технічною проблемою є утворення NO_x через азотний компонент палива, і Mitsubishi намагається вирішити цю проблему за допомогою нової камери згорання аміаку та СКВ у газовій турбіні серії H-25.

Не тільки викиди CO_2 , але й накопичення золи в печі, утилізацію золи та сульфідну корозію можна зменшити шляхом заміни частини палива, що використовується на вугільній електростанції, аміаком.

Компанія Chugoku Electric Power спробувала побудувати вугільно-аміачну електростанцію на 2-му блоці японської електростанції Mizushima (потужність 156 МВт) [12]. У цьому демонстраційному тесті викиди CO_2 були зменшені за рахунок кількості аміаку, що спалюється разом з вугіллям, і не було жодних змін у температурі металу теплообмінника. Аміачне паливо повністю згорало і не викидалося назовні. Підтверджено, що екологічні стандарти були задоволені без будь-якої різниці. Рівень спільного спалювання становив від 0,6% до 0,8% через обмеження потужності випарника аміаку; однак, перш за все, було підтверджено, що технологію спільного спалювання вугілля й аміаку можна застосовувати на електростанціях в комерційній експлуатації, як засіб зменшення викидів парникових газів.

Іншою енергетичною компанією проведено техніко-економічне обґрунтування спільного спалювання аміаку в існуючому великому вугільному енергетичному котлі [13]. Установки спалювання вугілля були оцінені шляхом розгляду різних даних про продуктивність для вивчення питань, що виникають у зв'язку із застосуванням спільного спалювання аміаку – наприклад, чи можна використовувати установки як вони є, або потрібні доповнення/зміни – разом із можливими рішеннями.

Техніко-економічне обґрунтування було проведено для вугільного енергетичного котла потужністю 1000 МВт [13]. Аміак змішували з вугіллям – основним паливом – до 20% відносно теплової потужності котла. Під час випробування горіння було продемонстровано, що навіть при спільному спалюванні аміаку викиди NO_x можна обмежити до того самого рівня, що й при спалюванні вугілля, і підтримувати стабільне горіння шляхом подачі аміаку з центру пальника, працюючого на вугіллі.

Пряме використання безвуглецевих видів палива викликає інтерес у контексті розробки нових технологій згорання, приділяючи пильну увагу зменшенню викидів оксидів азоту та незгорілого аміаку.

На підставі нещодавніх спостережень, згідно яких умови збагаченого попереднього змішування пом'якшують надмірні викиди NO_x від згорання NH_3 , і рівномірно змішані аміачно-водневі паливно-повітряні суміші мають тенденцію експоненціально збільшувати утворення NO_x , Jin U. та Kim K. T. [14] пропонують гібридну конфігурацію збагаченого воднем кінетичного аміачно-повітряного полум'я (внутрішня стадія) та збідненого полум'я чистого водню (зовнішня стадія) у радіально розшарованій первинній реакційній зоні. Ця схема розподілу палива, як стверджують автори, пропонує механізм зменшення викидів NO_x , контрольованого хімічною кінетикою.

Експериментальна установка, яка використовувалася в дослідженні [15], була переналаштована для забезпечення гнучкості операцій поводження з чистим аміачним паливом або аміачно-водневими сумішами. Установка для випробування складається з секції вхідного потоку, вузла форсунок внутрішніми діаметрами 6,5 мм, циліндричної секції кварцової труби для візуалізації полум'я, жарової труби змінної довжини та мокрого скрубера розпилювального типу для видалення незгорілого аміаку. Кожен елемент інжектора оснащений шестилопатевою осью завихрювачем під кутом 44° проти годинникової стрілки. Зовнішня поверхня кварцової труби та наступні секції жарової труби активно охолоджуються за допомогою високошвидкісного повітряного струменя. Додаткові відомості про цю експериментальну установку та інструменти можна знайти в [14, 15].

Зауважено, що суттєво різні неоднорідні реакційні області можуть бути встановлені у відносно компактному об'ємі згоряння без створення негативних ефектів стабілізації полум'я, таких як згасання менш реакційноздатного полум'я аміаку та спалах більш реакційноздатного водневого полум'я [14]. Порівняно з базовими умовами однорідної суміші показано, що гібридний метод розподілу суттєво зменшує загальні викиди оксидів азоту: від 7764 до 310 ppmvd (частин на мільйон за об'ємом у сухих газах), тобто зменшення на 96%. Отримані результати свідчать про те, що мінімальний рівень викидів NO_x можна ще знизити шляхом збільшення часу перебування в умовах підвищеного тиску. Водночас існує думка про незмінне обмеження рівня емісії, пов'язане з хімією азоту у складі палива.

Не менш вагомий внесок здійснено вітчизняними вченими [16], зокрема розробка і впровадження у промислому масштабі струменево-нішевої технології спалювання. Результати промислового впровадження технології дозволили накопичити значний обсяг технічної інформації та дали можливість попередньої екологічної оцінки при модернізації газоспалювального обладнання. Як показує практика, на сучасному етапі основним напрямком удосконалення технології є підвищення її екологічних показників. Визначено можливості зниження оксидів азоту первинними технологічними методами, найпростішим і ефективним з яких є введення рециркуляційних газів у топковий простір.

Встановлено, що ефективність введення рециркуляційних газів залежить від потужності агрегату та від їх сумарного об'єму при баластуванні окисника [16]. Відсоток зменшення оксидів азоту на один відсоток рециркуляційних газів становить $C_{\text{NO}_x}=2-8\%$, залежно від типу котлоагрегату та вищевказаних умов. Найбільша ефективність процесу досягається при часткових навантаженнях, коли повітря забаластоване газами не більше 5–7% за об'ємом. Розроблена схема рециркуляції реалізована в котлах на основі струменево-нішевої технології. Практичні результати говорять про те, що воно дає змогу на 1/3 підвищити ККД порівняно з технологіями вихрового спалювання за рахунок раціонального розподілу палива в об'ємі окисника.

Висновки

Теплові електростанції, включаючи вугільні електростанції та газові турбіни, є великим джерелом викидів CO_2 , і ефект скорочення викидів вуглецю може бути максимізований, якщо в системах спалювання використовується аміак.

Щоб сприяти декарбонізації енергетичного сектора, використання аміаку як палива безпосередньо, або змішаного з іншими видами палива, може мати значні переваги. Завдяки високій об'ємній щільності енергії (порівняно з воднем) і добре налагодженій виробничій і транспортній інфраструктурі аміак є привабливим стійким енергоносієм. Однак використання аміаку при спалюванні не позбавлене проблем, включаючи низьку швидкість полум'я, вузькі межі займистості, схильність до утворення NO_x .

Оскільки спалювання аміаку характеризується високими викидами NO_x і низькою стабільністю полум'я, потрібне ретельне дослідження перед широким застосуванням аміаку у паливоспалюючому обладнанні. Механізми чистого або спільного з іншими видами палива згоряння аміаку мають бути детально з'ясовані з точки зору хімічної кінетики. Така інформація важлива для запобігання надмірному утворенню NO_x і покращення стабілізації полум'я.

У фундаментальних дослідженнях слабка займистість аміачно-повітряного полум'я може бути посилена шляхом додавання більш реакційноздатних палив, попереднім нагріванням вхідних газів і підвищенням концентрації кисню. Однак важко ввести додаткові паливні гази або чистий кисень у систему спалювання для виробництва електроенергії. Спільне спалювання певного палива з аміаком потребує додаткових витрат, оскільки супроводжується об'єктами газопостачання, трубопроводами, системою контролю та безпеки.

Поточний рівень викидів NO_x під час згоряння аміаку в експериментах з газовими турбінами становить кілька сотень часток на мільйон, а викиди NO_x , що утворюються в результаті згоряння, відокремлюються через установку далі по ходу продуктів спалювання. Строго кажучи, такий підхід нівелює переваги використання безвуглецевого аміачного палива. Проблема можна вирішити, якщо розробити технологію спалювання з мінімальними викидами NO_x без очисного обладнання, наприклад, шляхом отримання реакції СНКВ під час згоряння. Найбільш поширеними способами для практичного зменшення викидів NO_x є багатоступеневе спалювання та рециркуляція димових газів.

У техніко-економічному обґрунтуванні для великих вугільних енергетичних котлів вченими було встановлено, що єдині модифікації, необхідні для спільного спалювання аміаку, стосуються системи подачі аміаку, а всі інші об'єкти можна використовувати згідно з існуючими специфікаціями. Однак результат був отриманий шляхом оцінки лише за одного набору конкретних умов, тому потрібне продовження розгляду через залежність результату від типу вугілля, рівня спільного спалювання аміаку тощо. У майбутньому, щоб підвищити можливість суспільного впровадження, планується оцінити можливість спільного спалювання аміаку з меншим підведенням тепла та розробити пальник, який може спалювати пиловугільну суміш з вмістом аміаку понад 20%.

Список використаної літератури:

1. Data and statistics – IEA. Режим доступу: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser/?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&>
2. CO₂ Emissions in 2022 – Analysis – IEA. Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
3. Science and technology of ammonia combustion / H. Kobayashi та ін. Proceedings of the Combustion Institute. 2019. Т. 37, № 1. С. 109–133. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>
4. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.04.2023 № 373-р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-p#Text>
5. A technological roadmap to the ammonia energy economy: Current state and missing technologies / N. Morlanés та ін. Chemical Engineering Journal. 2020. С. 127310. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127310>
6. A Roadmap to the Ammonia Economy / D. R. MacFarlane та ін. Joule. 2020. Т. 4, № 6. С. 1186–1205. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.04.004>
7. Volchyn I. A., Rashchepkin V., Cherervatskyi D. Green ammonia production for green deal of Ukraine. The Problems of General Energy. 2022. Т. 2022, № 1-2. С. 127–138. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.127>
8. Micro gas turbine firing ammonia / N. Iki та ін. In Proceedings of the 12th Annual NH₃ Fuel Conference, м. Chicago, IL, 20–23 вер. 2015 р.
9. Liquid ammonia spray combustion in two-stage micro gas turbine combustors at 0.25 MPa; Relevance of combustion enhancement to flame stability and NO_x control / E. C. Okafor та ін. Applications in Energy and Combustion Science. 2021. Т. 7. С. 100038. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2021.100038>
10. Feibelman PJ, Stumpf R. Comments on potential roles of ammonia in a hydrogen economy – a study of issues related to the use of ammonia for on-board vehicular hydrogen storage. Sandia Natl Lab 2006.
11. Mitsubishi Power Commences Development of World's First Ammonia-fired 40MW Class Gas Turbine System – Targets to Expand Lineup of Carbon-free Power Generation Options, with Commercialization around 2025. Mitsubishi Power. <https://power.mhi.com/news/20210301.html>
12. Yoshizaki T. Test of the co-firing of ammonia and coal at Mizushima power station. J. Combust. Jpn. 2019. № 61. С. 309–312.
13. JERA and IHI to Start a Demonstration Project Related to Ammonia Co-firing at a Large-Scale Commercial Coal-Fired Power Plant | Press Release (2021) | JERA. https://www.jera.co.jp/en/news/information/20210524_677
14. Jin U., Kim K. T. Hybrid rich- and lean-premixed ammonia-hydrogen combustion for mitigation of NO_x emissions and thermoacoustic instabilities. Combustion and Flame. 2024. Т. 262. С. 113366. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113366>
15. Jin U., Kim K. T. Influence of radial fuel staging on combustion instabilities and exhaust emissions from lean-premixed multi-element hydrogen/methane/air flames. Combustion and Flame. 2022. Т. 242. С. 112184. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112184>
16. Abdulin M. Z., Siryi O. A., Kobylianska O. O. Energy-ecological assessment of the boiler equipment modernized with the jet-niche technology. Journal of Mechanical Engineering. 2022. Т. 25, № 3. С. 46–55. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.046>

I. Shakhbazov^{1,2}, Ph. D. student, ORCID 0009-0003-8450-8564

O. Siryi^{1,2}, Ph. D. (Engin.), Assoc. Pr., ORCID 0000-0001-5811-9037

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

²Thermal Energy Technology Institute of the NAS of Ukraine

USING AMMONIA FUEL AS A MEASURE TO REDUCE GREENHOUSE GASES

The presented work highlights the possibilities of using ammonia as an alternative fuel in order to achieve low-carbon development of the state and strengthen the fight against greenhouse gases. Since the Industrial Revolution, combustion has been the primary method of energy conversion for human activities, including power generation and transportation. Today, these sectors continue to rely heavily on hydrocarbon fuels. As a result, the largest absolute increase in carbon dioxide emissions in 2022 was from electricity and heat production. With global electricity demand increasing by 2.7%, emissions in the energy sector increased by 1.8% (or 261 Mt), reaching an all-time high of 14.6 Gt. Thus, a large part of CO₂ emissions is produced through these sectors, which is the main culprit of global warming, undermining the fight against climate change. The need for decarbonization is taken into account by program documents, including government strategies, which not only warn but also prohibit the excessive formation of pollutants and stimulate the promotion of carbon-free technologies in energy

sectors. It is common knowledge that the innovative development of fuel combustion technologies is necessary to achieve the future goals of a carbon-neutral system. Despite the considerable efforts made to reduce greenhouse gas emissions during the combustion of hydrocarbons, for example, by increasing the combustion efficiency, these efforts are not enough to achieve low greenhouse gas emissions. The progress in this field is analyzed and it is found that ammonia is receiving increasing attention as one of the most attractive energy carriers due to its carbon-free nature. However, the use of ammonia in combustion is not without problems, including low flame speed, narrow flammability limits, and tendency to NO_x formation. Therefore, the further introduction of ammonia as a fuel in energy and industry requires comprehensive studies of the combustion working process. Research should be based on determining the influence of the main technological factors, the possibility of using mixed fuels, as well as establishing the optimal geometric and mode parameters of the fuel combustion system.

Keywords: greenhouse gases, carbon-free fuel, ammonia, decarbonization, co-combustion of ammonia, carbon dioxide, nitrogen oxides.

References

1. Data and statistics – IEA. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser/?country=WORLD&fuel=Energy%20supply>
2. CO₂ Emissions in 2022 – Analysis – IEA. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
3. H. Kobayashi, A. Hayakawa, K. D. K. A. Somarathne, and E. C. Okafor, “Science and technology of ammonia combustion”, *Proc. Combustion Inst.*, vol. 37, no. 1, pp. 109–133, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>
4. On the approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2050. Order of the Ministers Cabinet of Ukraine dated April 21, 2023 No. 373. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-p#Text>
5. N. Morlanés et al., “A technological roadmap to the ammonia energy economy: Current state and missing technologies”, *Chem. Eng. J.*, p. 127310, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127310>
6. D. R. MacFarlane et al., “A Roadmap to the Ammonia Economy”, *Joule*, vol. 4, no. 6, pp. 1186–1205, Jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.04.004>
7. I. A. Volchyn, V. Rashchepkin, and D. Cherervatskyi, “Green ammonia production for green deal of Ukraine”, *Probl. Gen. Energy*, vol. 2022, no. 1-2, pp. 127–138, May 2022. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.127>
8. N. Iki et al., “Micro Gas Turbine Firing Ammonia”, in *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Tech. Conf. Expo.*, Seoul, South Korea, Jun. 13–17, 2016. ASME, 2016. <https://doi.org/10.1115/gt2016-56954>
9. E. C. Okafor et al., “Liquid ammonia spray combustion in two-stage micro gas turbine combustors at 0.25 MPa; Relevance of combustion enhancement to flame stability and NO_x control”, *Appl. Energy Combustion Sci.*, vol. 7, p. 100038, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2021.100038>
10. PJ Feibelman, R Stumpf. Comments on potential roles of ammonia in a hydrogen economy – a study of issues related to the use of ammonia for on-board vehicular hydrogen storage. Sandia Natl Lab 2006.
11. Mitsubishi Power Commences Development of World's First Ammonia-fired 40MW Class Gas Turbine System – Targets to Expand Lineup of Carbon-free Power Generation Options, with Commercialization around 2025” Mitsubishi Power. [Online]. Available: <https://power.mhi.com/news/20210301.html>
12. T. Yoshizaki. Test of the co-firing of ammonia and coal at Mizushima power station. *J. Combust. Jpn.* no. 61, pp. 309–312, 2019.
13. JERA and IHI to Start a Demonstration Project Related to Ammonia Co-firing at a Large-Scale Commercial Coal-Fired Power Plant | Press Release (2021) | JERA.” JERA. [Online]. Available: https://www.jera.co.jp/en/news/information/20210524_677
14. U. Jin and K. T. Kim, “Hybrid rich- and lean-premixed ammonia-hydrogen combustion for mitigation of NO_x emissions and thermoacoustic instabilities”, *Combust. Flame*, vol. 262, p. 113366, Apr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113366>
15. U. Jin and K. T. Kim, “Influence of radial fuel staging on combustion instabilities and exhaust emissions from lean-premixed multi-element hydrogen/methane/air flames”, *Combust. Flame*, vol. 242, p. 112184, Aug. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112184>
16. M. Z. Abdulin, O. A. Siryi, and O. O. Kobylianska, “Energy-ecological assessment of the boiler equipment modernized with the jet-niche technology”, *J. Mech. Eng.*, vol. 25, no. 3, pp. 46–55, Sep. 2022. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.046>

Надійшла: 21.03.2024

Received: 21.03.2024

ВПЛИВ АНОМАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ НА ТОЧНІСТЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ВТРАТ В РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖАХ

Актуальність дослідження обумовлена сучасними трендами в управлінні режимами роботи розподільних електричних мереж із використанням технологій Smart Grid, а також необхідністю зниження витрат операторів систем розподілу на закупівлю електроенергії. Для цього потрібні точні результати прогнозування навантажень у вузлах мережі на різних горизонтах прогнозування. Різкі зміни топології мережі можуть збільшувати похибки прогнозу втрат як єдиного часового ряду, що негативно впливає на ефективність керування мережею та підвищує витрати на закупівлю електроенергії для покриття втрат.

У роботі було розглянуто методи прогнозування на основі штучних нейронних мереж для розрахунку та прогнозування втрат електричної енергії, а також проведено порівняння цих методів між собою. Розрахунки виконано на основі даних одного з українських операторів систем розподілу, а тестова електрична мережа адаптована на основі схеми CIGRE для моделювання втрат електричної енергії. Оскільки дані вузлового навантаження містили пропуски та аномалії, було використано двоетапний алгоритм аналізу даних із застосуванням методу кластеризації DBSCAN для їх виявлення та корекції. В результаті проведених обчислень втрат на основі достовірних даних, похибка втрат була зменшена втричі порівняно з розрахунками, що базуються на коефіцієнтах навантаження. Використання методів аналізу даних та прогнозування на основі штучних нейронних мереж значно підвищує точність розрахунків втрат і мінімізує похибки.

Ключові слова: втрати, вузлове навантаження, прогнозування, нейронні мережі, CIGRE, LSTM.

Вступ.

На ринку електроенергії України набуває все більшої актуальності задача прогнозування втрат електричної енергії в розподільних мережах. Точність прогнозування втрат електроенергії має безпосередній вплив на вартість електроенергії для споживачів. А саме, на формування кінцевих тарифів впливають витрати на придбання електроенергії операторами системи розподілу (ОСР) та операторами системи передачі (ОСП) для компенсації втрат у власних мережах [1]. Цей вплив здійснюється через складові тарифів ОСР та ОСП [2–4]. Крім того, неточне прогнозування може спричинити збільшення значень небалансів електроенергії. Це створює потребу в закупівлі додаткового обсягу електроенергії на балансуєчому ринку [5]. Внаслідок чого утворюється додатковий фактор зростання вартості електроенергії для ОСР і споживачів.

Здебільшого задля визначення втрат у мережах використовують узагальнені коефіцієнти втрат, які розраховані на основі сезонних пікових навантажень. Нестабільність топології мереж також ускладнює прогнозування втрат, що знижує ефективність управління енергосистемами [6].

Наявність точних прогнозів навантаження у вузлах мережі для різних періодів дозволяє не лише зменшити витрати на придбання електроенергії, а й оптимізувати управління режимами мереж, що особливо важливо в умовах впровадження технологій Smart Grid в Україні.

Розвиток методів машинного навчання та нейронних мереж для прогнозування втрат в електричних мережах є важливим кроком у вдосконаленні управління сучасними енергосистемами [7]. Традиційні методи розрахунку втрат, засновані на фізичних моделях, мають обмежену точність через складність врахування багатьох змінних, таких як динаміка навантаження, погодні умови, структурні особливості мережі та її стан. Використання машинного навчання дозволяє подолати ці обмеження завдяки здатності алгоритмів виявляти складні нелінійні залежності між параметрами, що важко формалізувати вручну. Нейронні мережі особливо ефективні завдяки їх гнучкості та здатності до навчання на великих масивах даних, що дає можливість прогнозувати втрати з високою точністю навіть у ситуаціях, коли початкові дані містять значну кількість невизначеності.

Наприклад, у роботі [8] було розроблено комбіновану нейронну мережу, в якій поєднано багатоваріовий перцептрон із алгоритмом авторегресії. Модель використовувала алгоритм авторегресії для попередньої обробки даних, а її ефективність перевірено на даних енергосистеми PJM у США за 2014–2015 роки. Інша комбінована модель, описана в [9], поєднує кілька нейронних мереж із модулем нечіткої

логіки (модуль PROTREN) для виявлення трендів на основі даних енергосистеми острова Крит, враховуючи інформацію про температуру повітря.

Метод Support Vector Machine (SVM) також широко застосовується для прогнозування вузлових навантажень. Як описано в [10], цей підхід використовується для управління енергосистемою провінції Шаньдун у Китаї. Модель враховує співвідношення між активною потужністю вузлів і системи загалом, а також взаємозв'язок активної та реактивної потужностей. Для оцінки ефективності SVM порівнювали з нелінійною авторегресійною нейронною мережею [11] та адаптивним фільтром Калмана, який використовується для прогнозування коефіцієнтів потужності вузлів.

Для зниження вартості втрат запропоновано використання сучасних методів розрахунку та прогнозування втрат електроенергії на основі методів штучної нейронної мережі глибокого навчання. Для перевірки ефективності прогнозування втрат електроенергії використовувалися різні архітектури штучних нейронних мереж глибокого навчання.

Виявлення та заміна аномальних значень у даних є надзвичайно важливими для забезпечення точності та стабільності прогнозування втрат в електричних мережах за допомогою штучних нейронних мереж. Аномальні значення можуть виникати через апаратні збої, помилки в записах даних або вплив зовнішніх факторів, таких як погодні аномалії чи надзвичайні стани в мережі. Якщо такі дані не обробляти, вони здатні значно вплинути на результати моделі, спотворюючи її прогнози та знижуючи здатність до узагальнення. Це особливо критично, адже нейронні мережі чутливі до якості вхідної інформації: навіть невелика кількість некоректних значень може викликати значне викривлення ваг моделі, змушуючи її адаптуватися до помилкових залежностей, які не відображають реальних фізичних процесів у мережі. При прогнозуванні часових рядів це може відбуватись через вплив аномальних значень на цільову функцію при навчанні нейронних мереж, наприклад, середньоквадратичну похибку, яка є чутливою до великих відхилень.

Обробка аномальних значень також сприяє покращенню стабільності роботи нейронної мережі. У випадку складних енергосистем, де багато параметрів взаємозалежні, некоректні дані можуть створювати нелогічні зв'язки між змінними, що суперечать фізиці процесу. Це не лише погіршує прогноз, але й може призводити до некоректних висновків про стан мережі. Заміна або видалення аномалій допомагає нейронній мережі навчатися на коректних даних і створювати моделі, які відображають реальну поведінку енергосистем.

Таким чином, вчасне виявлення та заміна аномальних значень є ключовим етапом у процесі підготовки даних для прогнозування втрат. Це забезпечує не лише більш точні та надійні результати, а й підвищує довіру до прогнозу, адже модель базується на даних, які відповідають реальним умовам і фізичним закономірностям.

Для оцінки впливу аномальних значень на точність прогнозування втрат було розроблено два підходи до прогнозування втрат:

- Прогнозування навантаження кожного вузла окремо з подальшим розрахунком втрат на основі прогнозованих даних.
- Розрахунок втрат електричної енергії з наступним її прогнозом.

Для прогнозування всіх вузлів навантаження використовувалась рекурентна нейронна мережа типу LSTM, яка описана в [12]. Для індивідуального прогнозування вузлів навантаження та втрат електроенергії використовувалася мережа eResNet, розроблена в Інституті електродинаміки. На рисунку 1 показано блок-схеми алгоритмів прогнозування та розрахунку втрат електроенергії.

Обидва методи прогнозування були адаптовані до ретроспективних даних «Вінницяобленерго». Навчання обох алгоритмів проводиться за допомогою алгоритму оптимізації ADAM.

Розрахунок втрат та прогнозування електричної енергії виконувалось на ретроспективних даних «Вінницяобленерго» які включають в себе 16 вузлів навантаження за період з 2017 по 2019 роки з 30-хвилинною дискретністю. Загальний обсяг даних становить 48 048 значень.

Для моделювання електричної мережі та розрахунку втрат була використана мережа середнього рівня напруги CIGRE [13] як основа для тестової електричної мережі.

Мова програмування Python та бібліотека для аналізу даних Pandarpower були використані для побудови та аналізу тестової системи живлення. Бібліотека Pandarpower являє собою окремий набір інструментів для розробки та аналізу електричних мереж. Бібліотека охоплює широкий спектр різноманітних моделей електричних мереж, включаючи численні тестові системи та приклади енергосистем CIGRE [14].

Тестова електрична мережа складається з двох трансформаторів потужністю 40 МВА 110/20 кВ, 15 вузлів, 18 джерел навантаження, з вилученими двома джерелами для узгодження з ретроспективними даними, 14 ліній, у тому числі 12 кабельних і дві повітряні, вимикач. Усі елементи, які використовуються в цій мережі, є елементами бібліотеки Pandarpower.

Дана тестова мережа була розроблена для моделювання режимів роботи електричної мережі та визначення втрат електричної енергії, дана мережа представлена в статті [15]. Оскільки ця мережа

побудована на основі реальної європейської мережі, вона суттєво відрізняється за складом навантаження та параметрами від української мережі. Тому для забезпечення належного функціонування алгоритму розрахунку збитків схему розрахунку було адаптовано з використанням наявних ретроспективних даних.

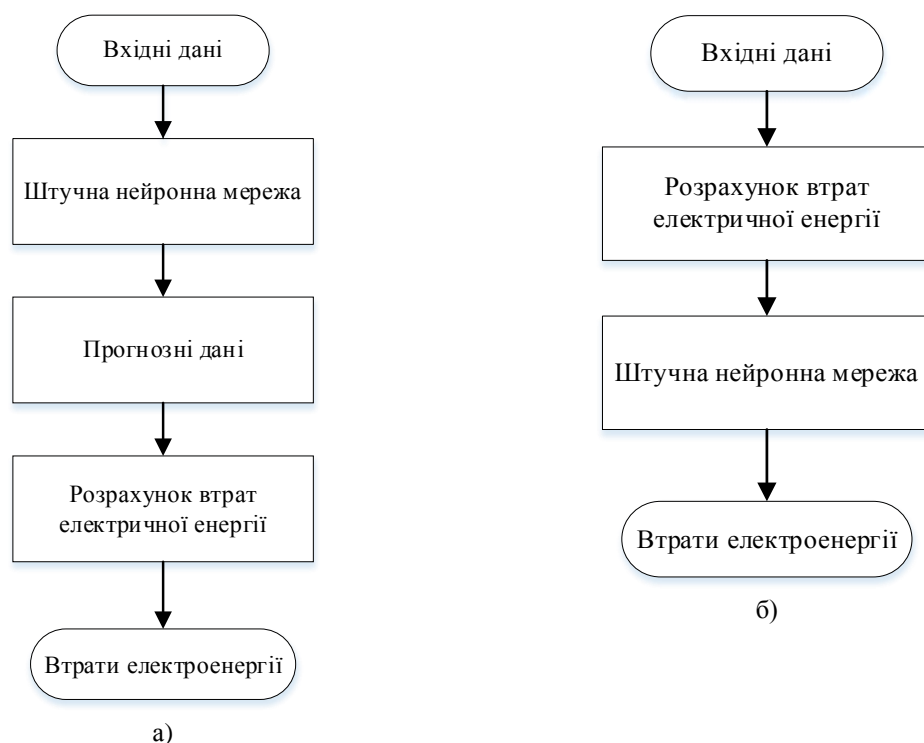


Рисунок 1 - а) Розрахунку втрат за прогнозними значеннями; б) Розрахунку та прогнозування втрат

Враховуючи різницю у величині навантаження між енергосистемою CIGRE та даними ОСП, кабельні та повітряні лінії були замінені на лінії більшого перерізу для належного функціонування тестової енергосистеми. Крім того, дані про навантаження вузлів від ОСП розподілялися відповідно до величин навантаження вузлів енергосистеми CIGRE.

Після проведення попереднього аналізу даних було виявлено, що дані містять пропуски значень та аномальні значення, які значно відрізняються від нормальних значень.

Для виявлення та заміни відсутніх значень і аномальних даних був застосований двоетапний алгоритм перевірки даних з використанням методу кластеризації DBSCAN [16].

Запропонований алгоритм достовірності для окремого вузла складається з наступних етапів:

1. Вибір часових зрізів із безперервного часового ряду навантаження $R^{n \times 1} \rightarrow R^{n/24 \times 24}$.

2. Виявлення грубих аномальних значень у часових зрізах за допомогою методу кластеризації DBSCAN.

Значення, які не належать до першого кластера, вважаються аномальними.

3. Заміна аномальних значень за допомогою лінійної інтерполяції.

4. Розгортка часових зрізів у безперервний ряд навантажень $R^{n/24 \times 24} \rightarrow R^{n \times 1}$.

5. Декомпозиція часового ряду на трендову, сезонну та залишкову складові.

6. Виявлення аномальних значень (п. 2) у часовому ряді залишкової складової.

7. Заміна виявлених значень за допомогою лінійної інтерполяції.

Ретроспективні дані вузлового навантаження на були розділені на вибірки для навчання та тестування, для даних з аномальними значеннями та даних без аномальних значень (після перевірки). Навчальні набори охоплюють усі значення навантаження вузла, за винятком 336 значень, що представляють один тиждень (7 днів), які використовувалися як тестовий набір.

Результати прогнозування втрат за день та тиждень наведені на рисунках 2-3.

Для оцінки точності представлених підходів була використана функція середньої абсолютної відсоткової помилки у відсотках (MAPE). У таблиці 1 наведені похибки розрахунку втрат електричної енергії.

Провівши прогнозування та розрахунок втрат з використанням усіх підходів, ми спостерігаємо, що, як правило, прогнозування навантаження з подальшими розрахунками втрат мають меншу похибку втрат. Також варто зазначити, що використання методів аналізу даних для виявлення та заміни аномальних значень дозволяє покращити результати прогнозування.

Отримані результати дослідження є складовою роботи з підготовки даних для моделі Smart Grid для оперативного управління розподільними мережами на основі методів штучного інтелекту. Ця модель розробляється авторами публікації в рамках спільного українсько-литовського проекту «Спільні українсько-литовські науково-дослідні проекти у 2024 – 2025 роках».

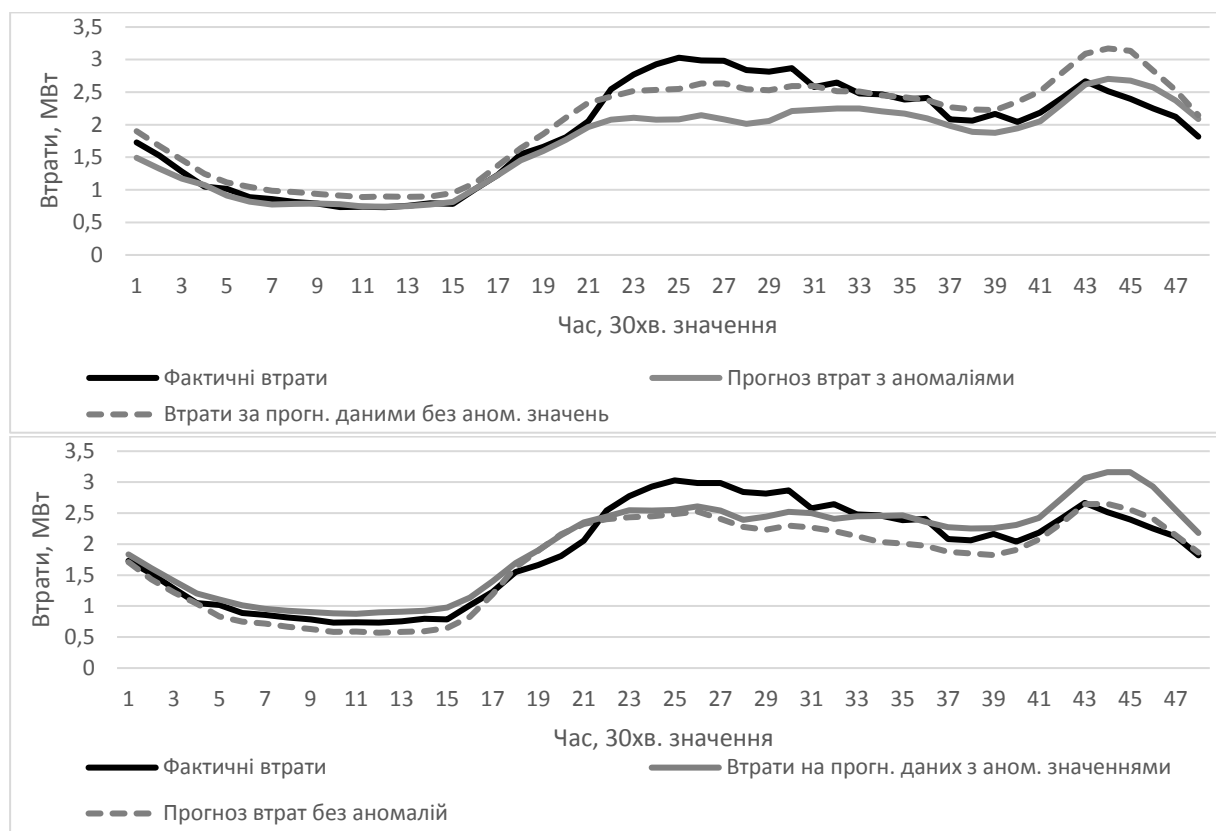


Рисунок 2 - Півгодинні значення втрат за добу з використанням різних методів прогнозування

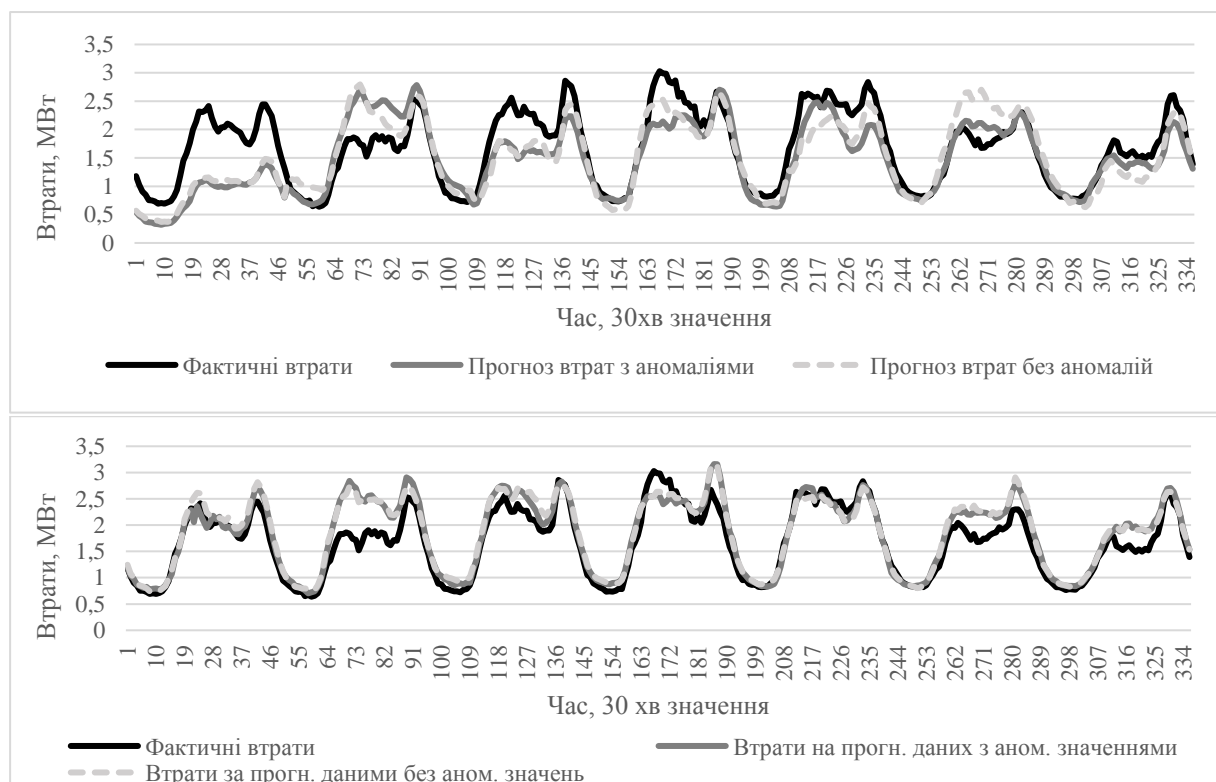


Рисунок 3 - Півгодинні значення втрат за місяць з використанням різних методів прогнозування

Метод прогнозування втрат	Величина похибки MAPE, %
Прогноз втрат з аномаліями	20.08
Прогноз втрат без аномалій	20.24
Втрати за прогнозними даними з аномальними значеннями	12.78
Втрати за прогнозними даними без аномальних значень	3.29

Висновки.

Розглянута методика короткострокового прогнозування величин сумарних втрат електричної енергії в мережі на основі ретроспективних даних з використанням штучних нейронних мереж глибокого навчання дозволила підвищити точність визначення втрат без виконання їх розрахунку порівняно з існуючими методами.

Крім того, запропоновано методи короткострокового прогнозування вузлових навантажень на основі штучних нейронних мереж глибокого навчання. Це дозволило підвищити точність визначення розрахункових значень втрат в мережі за рахунок їх врахування прогнозованих значень навантажень вузлового навантаження під час розрахунку.

Результати прогнозування втрат електроенергії показують, що застосування методів аналізу даних і методів прогнозування дозволяє знизити величину втрат порівняно з прогнозними даними фактичних втрат з наявними аномальними значеннями.

Проведення додаткового аналізу даних для виявлення та заміни аномальних значень підвищило точність прогнозів як для вузлів навантаження, так і для втрат електричної енергії.

Похибка прогнозування втрат з використанням штучних нейронних мереж дозволяє отримати похибку MAPE в межах 3,29% для прогнозованих достовіризованих даних вузлів навантаження, які використовуються для розрахунку втрат. Тоді як прогнозування втрат достовіризованих даних мають похибку 20,24%. Похибка втрат для неперевічених даних становить 20,08%.

Використання методів прогнозування найбільш ефективно продемонстровано при прогнозуванні достовіризованих даних вузлів навантаження, які використовуються для розрахунку втрат.

На основі представлених результатів у подальших дослідженнях планується удосконалити методи прогнозування та розрахунку втрат електричної енергії, зокрема з можливістю використання додаткових коефіцієнтів. Крім того, для отримання більш точних значень втрат необхідно будувати власні тестові мережі на основі реальних схем електричних мереж.

Публікація підготовлена за результатами виконання спільного українсько-литовського науково-дослідного проекту «Smart Grid модель для оперативного керування розподільними мережами на основі методів штучного інтелекту».

I. Blinov¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0001-8010-5301

P. Shymaniuk¹, Ph. D., ORCID 0000-0002-7585-7493

V. Sychova¹, Ph. D., ORCID 0000-0001-7385-1680

V. Mirosnyk¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-9036-7268

¹**Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine**

INFLUENCE OF ANOMALOUS VALUES ON THE ACCURACY OF FORECASTING LOSSES IN DISTRIBUTION NETWORKS

The relevance of the study is determined by modern trends in managing the operation modes of distribution electrical networks using Smart Grid technologies, as well as the need to reduce the costs incurred by distribution system operators for purchasing electricity. Accurate load forecasting results at network nodes for different forecasting horizons are crucial for this purpose. Sudden changes in network topology can increase the errors in loss forecasts as a single time series, negatively impacting network management efficiency and increasing the costs of electricity procurement to cover losses.

The study proposes using forecasting methods based on artificial neural networks for the calculation and prediction of electricity losses, along with a comparison of these methods. The calculations were performed using data from one of Ukraine's distribution system operators, and the test electrical network was adapted based on the CIGRE scheme for modeling electricity losses.

Since the nodal load data contained gaps and anomalies, a two-step data analysis algorithm was employed using the DBSCAN clustering method for detection and correction. As a result of loss calculations based on cleaned data, the error was reduced threefold compared to calculations based on load factors. Applying data analysis methods and forecasting methods based on artificial neural networks significantly improves the accuracy of loss calculations and minimizes errors.

Keywords: losses, node load, forecasting, neural networks, CIGRE, LSTM.

References

1. Miroshnyk V Blinov I and Shymaniuk P. “The cost of error of day ahead forecast of technological losses of electrical energy”. In: *Tekhnichna elektrodynamika* 5 (2020), pp. 70–73. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.070>. Blinov I. Problems of functioning and development of a new electricity market model in Ukraine. *Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr*, 2021, vol. 3. pp. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2021.03.020>.
2. On the electricity market: Law of Ukraine No 2019-VIII of 13.04.2017.
3. Resolution 14.03.2018 No. 307 On approval of the Market Rules.
4. NEURC Resolution “On Approval of Distribution Network Code” No. 310 of 14. 03.2018.
5. Miroshnyk V Blinov I and Sychova V. Short-term forecasting of electricity imbalances using artificial neural networks. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* (2023), pp. 1–7. DOI:10.1088/1755-1315/1254/1/012029.
6. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchanskyy V., Shkarupylo V. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 2021, pp. 262–265, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981
7. ENTSO-E RDI Roadmap 2024–2034. Innovation Missions to build the power system for a Carbon-Neutral Europe. https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/Publications/RDC%20publications/entso-e_RDI_roadmap_2024-2034_240710.pdf
8. Hou G et al. “A novel algorithm for multi-node load forecasting based on big data of distribution network”. In: *International Conference on Advanced Electronic Science and Technology (AEST 2016)* (2016), pp. 655–667.
9. Hatziaargyriou N Wang X and Tsoukalas L H. “A new methodology for nodal load forecasting in deregulated power systems”. In: *IEEE Power Engineering Review* (2020), pp. 48–51. doi: <http://hdl.handle.net/123456789/14566>.
10. Hatziaargyriou N Wang X and Tsoukalas L H. “A new methodology for nodal load forecasting in deregulated power systems”. In: *IEEE Power Engineering Review* (2020), pp. 48–51. doi: <http://hdl.handle.net/123456789/14566>.
11. Bezerra U H Falcao D M. “Short-term forecasting of nodal active and reactive load in electric power system”. In: *IEE Conf. Publication* (1986), pp. 18–22.
12. Miroshnyk V Chernenko P and Shymaniuk P. Univariable short-term forecast of nodal electrical loads of energy systems. 2020. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.067>.
13. “Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources”. In: *ELECTRA* (2014). doi: http://e-cigre.org/publication/ELT_273_8-benchmark-systems-for-network-integration-of-renewable-and-distributed-energy-resources.
14. Styczynski Z A Rudion K Orths O and Strunz K. “Design of benchmark of medium voltage distribution network for investigation of DG integration”. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada* (2006). doi: DOI : 10 . 1109 / PES . 2006 .1709447.
15. P. Shymaniuk, V. Miroshnyk, I. Blinov Determination of electrical losses based on nodal electrical loadforecasts. *Energy: economics, technology, ecology*. 2022. Vol. 3. Pp.38-43. DOI 10.20535/1813-5420.3.2022.271484
16. Sander J Ester M Kriegel H P and Xu X. “A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise”. In: *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)* (1996), pp. 226–231.

Надійшла: 26.11.2024
Received: 26.11.2024

ЕКОЛОГІЯ

ECOLOGY

DOI 10.20535/1813-5420.4.2024.315598

M. Hajivand¹, PhD student, ORCID 0000-0002-9990-9761

D. Dolmatov¹, Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-7268-1509

¹National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»

EFFECT OF LIQUID KEROSENE DROPLET INJECTION AT VARIOUS RADIAL AND TANGENTIAL VELOCITIES ON NO_x, CO FORMATION, AND TEMPERATURE DISTRIBUTION

This research presents a numerical analysis and CFD simulation of liquid kerosene combustion by means of a variation of liquid kerosene radial and tangential velocity components of injected droplets through an atomizer into a real combustor. The droplets are considered through the Rosin-Rammler droplet particle size distribution with the Eulerian-Lagrangian Spray Atomization model. The main purpose of this investigation is to evaluate the behavior of emission formations such as NO and CO, including temperature distribution fluctuations in the primary combustion zone during the combustion process and droplet evaporation. For the simulation of evaporated kerosene combustion, the flamelet model was performed for the detailed kinetic scheme of chemical reactions between (JetA-C10H22) and air, which is integrated in ANSYS CFX, including the thermal and prompt prediction of NO. The standard k-ε turbulence model was used with enhanced wall treatment including P1 radiation model. Verification and validation of analysis results were considered in this study, where the results, such as temperature and NO formation in various radial distances of combustor, were compared with the real experimental results. The results showed that droplet behavior, influenced by injection velocities, significantly impacts the combustion process, including temperature distribution, NO_x formation, and CO emissions especially in the primary combustion zone.

Keywords: CFD, combustion, atomization, emissions, spray, droplet evaporation, flamelet.

Introduction

In gas turbine engines the way that liquid fuel droplets are sprayed into the combustion chamber plays a role, in how the combustion process unfolds. The swirling movement of these droplets has an impact on factors like flame stability dynamics and overall structure. Understanding how liquid fuel droplets behave in swirling conditions specifically those made up of C10H22 (decane) is key to optimizing combustion efficiency and cutting down on harmful emissions such, as nitrogen oxides (NO_x) and carbon monoxide (CO).

In gas turbine engines fuel atomization and droplet movement are engineered to generate a swirling turbulent flow that enhances the mixing of fuel and air, in combustion chambers. The centrifugal forces resulting from this swirl pattern produced by swirlers affect the distribution of fuel droplets in radial directions well, as tangentially in the injection process. The speed factors play a role, in influencing how heat is spread out and how flames move in the burning area while also affecting how long droplets stay there. One of the concerns in this scenario is the creation of NO_x emissions which occur mainly at combustion temperatures due to the nitrogen and oxygen reaction, in the atmosphere. The duration of hot gas exposure and the temperature of the flame are factors, in NO_x production process. Influenced by how swirling fuel droplets interact with the surrounding air environment. When fuel droplets swirl around it creates recirculation areas that alter the flames shape and can lead to varying levels of NO_x and CO formation based on flow circumstances.

Researchers are working to create combustion systems that not only meet increasingly strict environmental laws but also ensure steady and efficient burning. Besides that, they are exploring the effects of swirling fuel droplets on flame dynamics and the formation of harmful substances produced in combustion products.

Even though studies on liquid fuel combustors have yielded a wealth of knowledge, more research should be done on the distribution of fuel injection output from fuel injection systems and the mixing process, which have a significant impact on the quantity and quality of pollutants released during combustion process [1].

Analysis of Recent Research and Publications

K. K. Rink and A. H. Lefebvre in 1989 [2], in their investigation reported that, atomization quality affects NO emission levels through the evaporation and mixing characteristics of the spray. Generally, the influence of

atomization quality is most apparent at slightly fuel-lean conditions, with reduced drop sizes leading to diminished NO, CO and UHC emissions.

Hajivand M et al. [1] showed in their study that atomization quality, such as the initial diameter of droplets and spray cone angle, affects emission levels through the evaporation and mixing characteristics of the spray; in other words, they improved that the influence of atomization quality is most definite at slightly fuel-lean conditions, with reduced initial drop sizes and cone angle of spray leading to decreased emissions.

The results of the investigation of Kankashvar et al. [3] showed that increasing the air flow rate decreased the stability range of the combustor, and increasing the fuel injection angle improved the lean blowout limit of the combustor and allowed it to work in extreme lean conditions. They also found that the temperature of the center of the chamber was lower with a higher fuel injection angle, and the temperature of the center of the chamber exit decreased with increasing air flow rate. Besides that, the authors concluded that increasing the spray cone angle improved the lean blowout limit of the chamber and allowed for flame stabilization even in extreme lean conditions.

The studies of Dafsari et al. [4] were aimed at the experimental analysis of atomization quality and the spray structure of aviation fuels with different viscosities, which were sprayed using a pressure swirl type nozzle with laser diagnostics. And they discovered that the injection pressure controlled both the overall spray structure and the quality of atomization of the fuel, which depended on the physical characteristics of the fuel. Lower viscosity fuels were found to be able to produce the ideal spray characteristics required in the combustion field, namely, well-developed hollow-conical sprays with finer drops, a wide distribution of size, and higher velocity components. It has been depicted that sufficient swirl intensity is necessary for the transitional development of hollow-conical sprays based on physical properties and injection pressure.

The decrease in pollutant emission concentrations for small droplet sizes is attributable to inadequate atomization with large droplet sizes, which causes localized fuel-rich burning, ultimately leading to the generation of soot and nitrogen oxides [4,5,6].

Bishop, K et al. [7] have investigated the impact of fuel nozzle condition on temperature distributions in nozzle guide vanes using an optical patternator. Their study quantified average spray cone angle, symmetry, and fuel streaks. Besides that, an ambient pressure and temperature combustion chamber test rig was used to capture exit temperature distributions and determine the pattern factor. Their obtained results showed that small deviations from the nominal distribution in the fuel nozzle spray pattern led to an increased pattern factor, possibly due to degradation of mixing processes. Spray cone angle had the most significant influence, while spray roundness and streak intensity had less influence. Comparisons were made with published studies on combustion chamber geometry, and recommendations for fuel nozzle inspections were made.

Many researchers conducted experimental studies on fuel spray atomization and employed CFD methodologies, concluding that the atomizing gas significantly influences spray atomization [3,8,9,10].

The spray angle, derived from high-quality pictures, significantly affects both the spray pattern and droplet size [11]. Gong and Fu [12] examined the impact of structural factors and viscosity on the spray angle of a swirling atomizer employed in combustion. They utilized oil in their studies and established empirical correlations to ascertain the discharge coefficient and spray angle.

The purpose of this study

During the CFD study conducted here were six scenarios analyzed to delve into how changing velocity components in different kerosene injection directions, such as radial and tangential, impacts combustion dynamics and flame characteristics while affecting the levels of NO_x, CO emissions, and temperature distribution, implemented in ANSYS CFX [15,16].

The initial three cases concentrated on examining the changes in tangential velocity of droplets injected into the combustion chamber. Besides that, the other cases were the variation of the droplet radial injection velocity. The main goal in these scenarios was to assess the performance of the combustion procedure in the area where maximum NO_x development happens. This region is distinguished by temperatures and strong chemical responses, making it essential to comprehend how the spinning droplets impact the flame front and general combustion dynamics. The appearance of the flame and how steady and strong it combusts are factors in gauging how well combustion is working and what emissions are being produced. Our goal was to study how adjusting the swirling radial and tangential velocity affects these characteristics, specifically focusing the creation of CO, NO_x, and temperature distributions in the primary combustion zone.

The main material of the study

The governing equations, turbulence, mathematical modeling of combustion process and radiation

The principles, behind fuel combustion are built upon rules related to preservation and the transfer of momentum and energy in addition to incorporating extra equations to address turbulence and combustion mechanisms. The research employs the known $k-\epsilon$ turbulence model which tackles two equations – one for the turbulent kinetic energy (referred to as k) and the other, for how this energy dissipates (indicated as ϵ). Through the years turbulence models have been crafted by scientists offering levels of intricacy and applicability across different scenarios. In this study approach, to modeling turbulence properties for high Reynolds numbers in flows

involves solving two differential equations – one for kinetic energy (referred to as k) and another for dissipation rate (referred to as ε). Although this method is moderately intricate in nature it has garnered acceptance in research works due to its effectiveness, under diverse flow scenarios. The initial equations that form the basis of this model were initially presented by Launder and Spalding in 1974.

The constant model of PDF (Probability Density Function) flames created by Peters [13] relies on ideas; It suggests that turbulent combustion happens through multiple separate and stable laminar flames and that the flames thickness is less, than the smallest turbulent length scale (referred to as the Kolmogorov length scale) enabling the flame structure to stay laminar [14]. The turnover time, for eddies is longer than that for chemical reactions in this context; hence any short-lived effects are considered insignificant within the model's framework. Furthermore, this model has been incorporated into CFD software such as Fluent, Star. CD, Star. CCM and CFX. Its widespread usage, across applications can be attributed to its effectiveness strong convergence capabilities and satisfactory level of accuracy [14]. In this study Jet-A aviation fuel (kerosene) with air, modeled as a two-component surrogate fuel (by mass 60 % C₁₀H₂₂ and 40 % C₉H₁₂).

In the laminar flamelet model available in ANSYS CFX, the species mean mass fractions are stored in the flamelet library as a function of the mean mixture fractions \tilde{Z} , its variance \tilde{Z}''^2 [16,]. The Favre mean species mass fraction can then be calculated with a probability density function \tilde{P} [16,17].

$$\tilde{Y}_i = \int_0^1 Y_i(Z, \tilde{\chi}_{st}) \tilde{P}(Z) dZ \quad (1)$$

typically, a β -function is used as the pdf of the mixture fraction is used, which in other words, it can be written like $\tilde{P}(Z, x, t)$. The pre-integration of flamelet tables is done with CFX-RIF [16] automatically.

In the flamelet model context of solving transport equations, for each chemical element we focus solely on the transport equations for the Favre average mixture fraction and its variance. By assuming rates for all species (uniform diffusivities) we can represent the transport equation, for the Favre mean mixture fraction as;

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{Z})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{Z})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\bar{\mu} + \frac{\mu_t}{\sigma_Z} \right) \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

Where μ is the molecular dynamic viscosity, μ_t the turbulent viscosity and σ_Z is a model coefficient. As the mixture fraction is a conserved scalar, its transport equation contains no source term. The transport equation for the mixture fraction variance \tilde{Z}''^2 can be modeled as follows [16].

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{Z}''^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{Z}''^2)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\bar{\mu} + \frac{\mu_t}{\sigma_{Z''^2}} \right) \frac{\partial \tilde{Z}''^2}{\partial x_j} \right] + 2 \frac{\mu_t}{\sigma_Z} \left(\frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x_j} \right)^2 - \bar{\rho}\tilde{\chi} \quad (3)$$

where $\sigma_{Z''^2}$ and C_χ in equation (4) are model coefficients. The first term on the right-hand side represents the production of variance, whereas the last term models its dissipation. The instantaneous scalar dissipation rate is modeled as [16].

$$\tilde{\chi} = C_\chi \frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}} \tilde{Z}''^2 \quad (4)$$

With $\tilde{\varepsilon}$ and \tilde{k} being the dissipation rate and the turbulent kinetic energy, respectively. As the species mass fractions are previously stored in a flamelet table, they can be obtained within the CFD simulation by coupling the CFD code with the flamelet libraries [13].

In the flamelet concept framework of combustion modeling the characteristics of the Favre mixture fraction. Its variation, alongside the scalar dissipation rate are calculated utilizing computational fluid dynamics (CFD). These quantities are subsequently employed to extract already computed species mass fractions, from a library dedicated to flamelet models [18].

Heat transfer plays a role, in fine-tuning and testing combustion system layouts with radiation being an element involved. In the context of a combustion system heat transfer takes place through conduction, radiation and inter diffusion [19]. Combustion essentially involves oxidation that produces heat and radiation underscoring the importance of radiation, in the chemical reaction process. At temperatures thermal radiation emerges as a means of energy transfer and needs to be taken into account when implementing a practical combustion system [19].

While radiation itself doesn't have an impact, on reactions, it does play a role in influencing the distribution of flame temperatures, which then affects various aspects of combustion processes. In research conducted by Chan and Viskanta back, in 2005 it was demonstrated that radiation can significantly alter flame temperatures, the concentrations of minor species present NO_x emissions levels, soot generation tendencies, flame extinguishment behavior and other phenomena related to combustion. The Differential Approximation (known as the P1 model) offers a method, for tackling the radiation transport equation by assuming that radiation intensity is uniform in all directions at a point, in space. A comprehensive explanation of the energy equation and the development of the P Model 2 are detailed by Modest [16,20].

Discrete particles numerical modeling

In the ANSYS CFX Theory Guide [16] when it comes to particle numerical modeling and simulating fluid movement using the Euler method specifically, the communication between various phases is depicted using distinct physical models [21]. The movement of mass between these phases is mimicked using a model for evaporation in this scenario. ANSYS CFX employs the Antoine equation (Equation 5) to replicate this process by determining the boiling point of kerosene [21]. The equation helps us establish the boiling point, which is then utilized to specify the source term for mass transfer in the simulation.

$$p_{\text{var}} = p_{\text{scale}} \cdot \exp \left(A - \frac{B}{T_p + C} \right) \quad (5)$$

In this case, T_p denotes the temperature of the droplet, while p_{scale} stands for a scaling factor; A, B, and C represent factors derived from reputable sources as, per this investigation, data about kerosene (C10H22). Studies indicate that slight alterations in the values of A, B, and C—falling within the range for hydrocarbons to kerosene—lead to negligible impacts in combustion efficiency, with an error margin of under 1.5%.

Using the size droplets uniformly spread out in the coolant liquid application process recommended a Rosin Rammler distribution, for better simulation accuracy without major changes to key parameters [22]. The Rosin Rammler model defined in (Equation 6) is frequently utilized in contemporary spray combustion simulations due to its effectiveness and efficiency. Has been implemented in both core flow and coolant injection scenarios, for this investigation [22]. In this chapter, we have talked about the Rosin Rammler distribution before. Now it's being shown in a light.

$$f(d) = \frac{q}{D} \left(\frac{d}{D} \right)^{q-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{d}{D} \right)^q \right] \quad (6)$$

where D is the size parameter, q for spread parameter and d stand for droplet diameter [16].

During the phase of dispersion analysis is conducted to establish the source terms between phases as outlined in the gas phase conservation equations. The spray is depicted as consisting of droplet categories spread out over an initial dispersion range. The speed, distance, mass and temperature of each category are monitored over time along their trajectories by applying the conservation equations within a Lagrangian framework [23].

This method enables monitoring of how everything behaves when it interacts with the fluid around it.

In the kth category we figure out how a moves, by looking at its speed and location along the way using a droplet as a reference point. The droplet speed is calculated based on the balance of forces. Considering both the droplets inertia and the drag force that affects it. This equation, for momentum can be expressed as follows:

$$m_d(k) \frac{du_{d_i}(k)}{dt} = \frac{\pi}{8} \tilde{\rho} [d(k)]^2 |u_i - u_{d_i}(k)| [u_i - u_{d_i}(k)] C_{drag} \quad (7)$$

The drag coefficient, C_{drag} , is evaluated following the spherical drag law [23].

The process of evaporation, from the droplets surface is simulated by assuming that the vapor pressure on the droplets surface matches the saturation pressure at the droplet's temperature [23]. To figure this out accurately for the liquid fuel used in this scenario a linear relationship between saturation pressure and temperature is applied in sections. The mass transfer coefficient is determined by referencing the Sherwood number correlation from Ranz and Marshall [24]. Consequently, we can represent the change in mass caused by evaporation, with:

$$\frac{dm_p}{dt} = \pi d_p^2 h_D (C_{fs} - C_f) \quad (8)$$

Where C_{fs} and C_f are the mass fractions of the fuel vapor on droplet surface and in the surrounding gas.

When determining how the temperature of a changes as it travels along its path, we apply an energy balance across the surface of the droplet. This balance considers both the heat transferred to the droplet through convection and the latent heat needed for evaporation. It can be written out in this way:

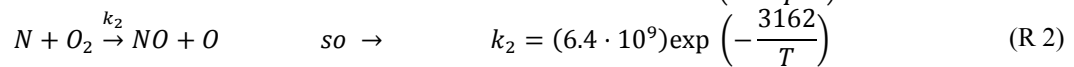
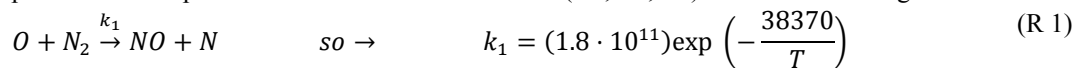
$$m_p c_{pp} \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T - T_p) - \frac{dm_p}{dt} \Delta H_v \quad (9)$$

The heat transfer coefficient (h) is calculated using the Nusselt number correlation from Ranz and Marshall [24], with radiation exchange with the gas phase being neglected.

NOx formation modeling

In gas flames that reach temperatures exceeding 1800 Kelvin (1527 degrees Celsius), the primary source of nitrogen oxide (NOx) is the presence of nitrogen and oxygen radicals in the environment within the flames grasp. The creation of NO or Zeldovich NO in conditions follows a sequence of simple chemical reactions as explained by Zeldovich in 1946 and elaborated upon by Baulch and others in 1994 [25]. Nitric oxide (NO) is a component formed when oxygen and nitrogen radicals interact with each other under elevated temperature circumstances. The Zeldovich mechanism involves two steps. Is accountable for reactions (denoted as R1 and R2). [16]. When the air fuel ratio leans towards either stoichiometric level, in certain scenarios a third reaction (referred to as R3) could start playing a significant role in the process alongside the initial two reactions. This phenomenon is known as the Zeldovich mechanism. The term "thermal" is employed because the first reaction requires a high activation energy owing to the bond found in N2 molecules. This characteristic causes the reaction to occur swiftly

at temperatures [25]. The initial response serves as the step that controls the speed at which thermal NO is generated in production processes. The speeds associated with each reaction (R1, R2, R3) are listed following their reactions.



When multiply the rates of reaction, by the concentrations of the substances involved in the reaction process and express it in [kmol/m³/s] it can then convert this outcome into a mass source term. This term indicates how much mass is being produced or used up, per unit volume within the system.

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] \quad (10)$$

So:

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[O][N_2] - k_2[N][O_2] - k_3[N][OH] \quad (11)$$

In ANSYS CFX Solver Theory Guide [16], the thermal formation in, kg/m³/s, $S_{NO, thermal}$, as described is therefore related to the rate of Reaction (R1):

$$S_{No,thermal} = 2W_{No} k_{thermal} [O][N_2] k_{thermal} = k_1 \quad (12)$$

This denotes the molecular mass of NO. Therefore, if the molar concentrations [O] and [N₂] of O radicals and N₂ are established, the thermal NO mechanism can be assessed [16].

Prompt NO formation happens when temperatures drop below 1800 K and since our simulation is conducted at temperatures exceeding 2000 K, we won't delve into the details of how NO forms but will incorporate the thermal formation of NO into the simulation.

In the process of conducting a CFD simulation we address the mass transport equation concerning the NO species by considering factors, like convection, diffusion, NO generation and consumption alongside species. This approach is essentially rooted in the concept of preserving mass. To accurately represent prompt reactions, we rely on the transport equation specific, to the NO species mentioned earlier [26].

$$\rho \frac{\partial Y_{NO}}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} \right) + S_{NO} \quad (13)$$

The source term S_{NO} is to be determined for different NO_x formation mechanism.

Validation of the employed combustion CFD model

With all the studies done about combustion systems so far, researchers have noticed a big gap when it comes to experiments specifically looking at how liquid fuels burn in combustion chambers. Many of the studies don't dive deep into measuring emissions, like NO_x levels and the amounts of important compounds, at the outlet of the combustor. Engineers and researchers usually hold back from sharing results in these areas, especially when it comes to how the related processes work in real-life situations and the complex behavior of jet stabilized configurations using liquid fuel. The limited availability of published findings underscores the obstacles and the necessity, for empirical research to comprehensively grasp the intricate interplays that influence NO_x emissions and other crucial performance factors, in these systems.

Recent research has thoroughly investigated the combustion and nitrogen oxide emission properties of jet-stabilized combustors. In a jet-stabilized combustor type, secondary air is injected by four radial wall jets, essential for flame stabilization [27]. This arrangement is non-swirling and does not depend on swirl-induced stabilization, in contrast to standard setups. Consequently, jet stabilization provides an extensive operational range, rendering it especially appealing for both experimental and numerical investigations (Bauer et al., 2020) [28].

In their study [28], Bauer and his team conducted experiments to understand how combustion and NO_x emissions occur in a jet-stabilized combustor. Kurreck and colleagues [29] used the k-epsilon turbulence model to forecast how flow patterns and temperature are distributed inside the combustor. In a study conducted by Bazdidi Tehrani and Zeinivand [30, 31], they used a method that combined the realizable k-epsilon turbulence model with presumed probability density functions (PDF) to replicate spray combustion in a jet-stabilized configuration. Their investigation also looked into how changing the quantity and locations of stabilizing jets affects both the efficiency of combustion and the emissions of NO_x. The findings suggested that extending the distance of the stabilizer jets lowers NO emissions while increasing the number of jet orifices results in NO emissions.

In addition, to that point mentioned above by Bazdidi Tehrani and Teymoori [32], they worked on improving the jet stabilized combustor to reduce the emission of substances like NO_x and soot particles. Their goal was to enhance this optimization process by adjusting the properties of the combustion chamber such as diameter, angle, and positioning of the stabilizing air jets. Their study also discusses the application of modeling

approaches like simulations, artificial neural networks, genetic algorithms, and multi-criteria decision-making techniques to reach optimal results. Furthermore, the article outlines the optimization process steps, the specifics of the simulations used, and validates these simulations by comparing them to data.

A study conducted by Alemi and colleagues [33] explored the impact of adjusting the angle and diameter of jet injection on NO emissions optimization results. The results were noteworthy; higher jet Reynolds numbers indicate an influence of injection angle on minimizing NO emissions at a 20° downstream angle. These findings underscore the importance of jet configuration for emissions control and improving the efficiency of jet-stabilized combustors.

The schematic of jet-stabilized combustor, mesh and boundary condition for investigation validation

The geometry of the present model combustor is inspired by the experimental setup documented by Bauer et al. [28]. As shown in (Fig. 1 a.).

The combustor is 400 millimeters long and 80 millimeters, in diameter with four stabilizing air jet holes measuring 8 millimeters each in diameter. These holes are placed around the circumference at intervals of 90 degrees. Are situated 60 millimeters away from the inlet plate. Moreover, a central liquid fuel atomizer of the air blast type (as seen in Fig. 1.) is installed in the combustor to ensure blending of fuel and air. The atomizer sprays fuel through a nozzle that's 0.7 mm of diameter, while air is discharged around the nozzle in a disk pattern with an inner diameter of 1 mm and an outer diameter of 3 mm [28]. To ensure accurate simulation of the turbulent flow within the model combustor, the computational domain is discretized using a structured mesh with 1,545,397 elements that includes a boundary layer, as shown in Fig. 1 a and b, employing the ICEM-CFD software generates multi-block structured meshes of the combustors.

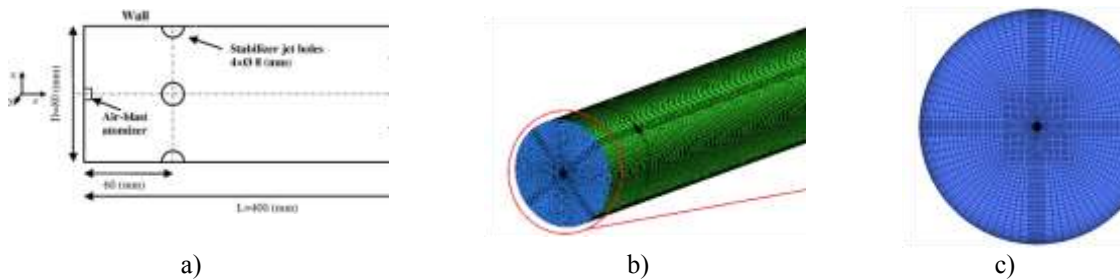


Figure 1 – The schematic and mesh of combustor a) Geometrical parameters; b) General view of combustor structured mesh c) The view of structured mesh with O-grid at center of injector

The boundary conditions are in atmospheric pressure with 1 atm [28] and 295K of temperature, the air mass flow of atomizer is 0.00033 kg/s, air mass flow through the jets is 0.0093 (kg/s) and liquid fuel (C₁₀H₂₂) mass flow rate is 0.00028 kg/s. For the modeling of droplet distribution Rosin-Rammler droplet size is 20 (micron) with the power of 2.5 and the initial droplet velocity is 10.5 m/s.

The simulation of combustion of kerosene in gas form was implemented in flamelet model of combustion and the combination of finite rate chemistry and eddy dissipation model FRC/EDM [16].

The NO_x formation and temperature distribution

As shown in Figures 2a and 2b, the temperature distributions at Z=1.75D and Z=2.275 demonstrate that the deviation between the CFD results, using the flamelet and FRC/EDM models, is not significant, which means less than 10%. Additionally, the comparison between the CFD results and the experimental temperature distribution obtained by Bauer et al. [28] at the same distances (mentioned above) shows good agreement, further validating the accuracy of the simulation.

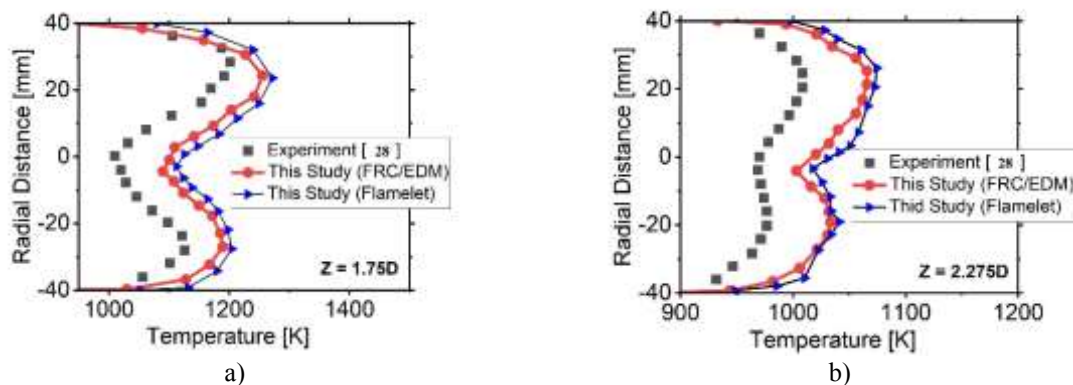


Figure 2 – Temperature distribution; a) in Z = 1.75D b) In Z = 2.275D

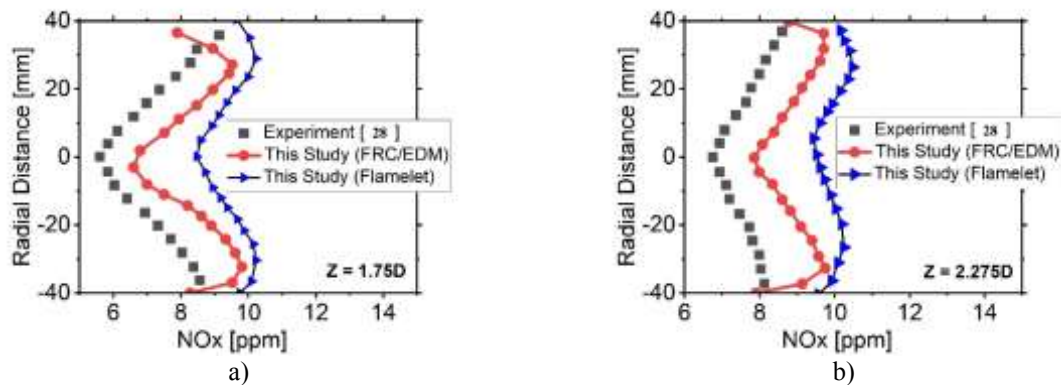


Figure 3 – The NO distribution; a) In $Z = 1.75D$ b) In $Z = 2.275D$

Figures 3a and 3b illustrate that at a distance of $Z=1.75D$, the discrepancy between the NO distribution forecasted by the flamelet model and the experimental results from Bauer et al. [28] surpasses 20%. At $Z=2.275$, the discrepancy between the flamelet model and the experimental results diminishes, indicating enhanced concordance. The NO concentrations predicted by the flamelet model significantly diverge from the experimental data, unlike the temperature outcomes, suggesting a substantial inconsistency that necessitates additional examination. This discrepancy indicates that further parameters, such as model assumptions or NO generation mechanisms, should be evaluated to enhance the simulation's accuracy.

The findings derived from the FRC/EDM model demonstrate a robust correlation with the experimental data at both distances, signifying enhanced predicted accuracy for NO distribution.

The main investigated combustor, combustion mathematical model, mesh and boundary conditions

The CFD study was conducted using a CAN combustion chamber that was previously introduced in studies by Prakash Ghose et al [23, 34, 35]. The combustion chamber is depicted more in Fig. 4a. The simulation was carried out in the same conditions that were explained in the abstract.

However, for a clearer examination of the development of the flame front and the formation of nitrogen oxides (NO_x), including temperature and CO distribution, we adjusted the conditions for this study in a way that differs from what was presented in Ghose Prakash et al. research. Specifically, we made changes to the mass flow rates for both the fuel and air streams to gain an insight into NO_x formation within a rich combustion setting.

The rate at which secondary air entered the combustion chamber was lowered to 0.005 kg/s to minimize its impact on the combustion process. This enabled us to examine the dynamics of the burn flame without being diluted by the air. Besides that, the flow rate of swirling air was changed to 0.05 kg/s. The C10H₂₂ fuel flow rate was adjusted to 0.001 kg/s. By adjusting these factors, our goal is to offer an understanding of how the mixing of fuel and air caused by swirl affects the creation of flames and the release of NO_x emissions, addressing the gaps that exist due to the constraints of experiments.

In Fig. 4b, the velocity distribution within the combustion chamber is shown under cold flow conditions (without combustion). The study utilized flow streamlines to anticipate the recirculation zone and internal velocity distribution crucial for setting and determining the axial injection velocity in our experiments. The cold flow simulation enabled us to concentrate on flow behaviors and notably the development of the recirculation zone.

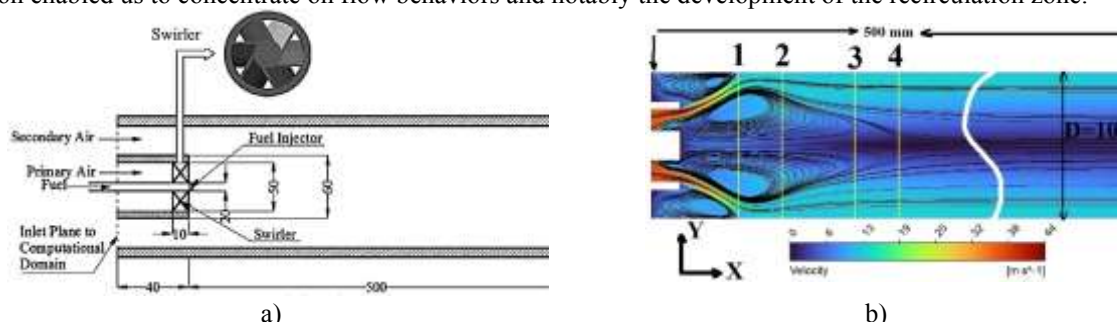


Figure 4 – The geometry and area of simulation; a) Physical geometry of the real combustor under study (Ghose P. et al.) [23,34,35]. b) The cold flow simulation contour plot of velocity and the area of investigation
 1) $X=0.04m$ 2) $X=0.07m$ 3) $X=0.0.12m$ 4) $X=0.15m$

Also, in Fig. 4b, the illustration indicated that the velocity near the fuel atomizer falls within the range of 30 to 35 meters per second (m/s). In order to maintain a flame formation and prevent any instabilities from arising, we settled upon an axial injection speed of 30 m/s for all scenarios under examination. This choice was influenced

by the necessity to restrict the injection velocity so it does not surpass the velocity around the atomizer and, within the CRZ zone, since surpasses could disturb flame structure and result in combustion instabilities. Matching the velocity of the injection with how the flow behaves in a cold flow situation ensures that the burning process stays steady and controlled when faced with real combustion conditions.

The cases of study

In this investigation, six different cases were examined, as outlined in Table 1. These cases were designed to explore the effects of varying droplet radial and tangential velocities on combustion dynamics, temperature distribution, flame behavior, NO_x and CO formation in the primary zone of combustion.

Table 1 – The various of atomization injection velocity component in various cases.

Cases	Axial velocity (m/s)	Radial velocity (m/s)	Tangential velocity (m/s)
1 th Case	30	0	10
2 th Case	30	0	17
3 th Case	30	0	30
4 th Case	30	5	17
5 th Case	30	12	17
6 th Case	30	27	17

The research, in the first three cases, delved into evaluating the changes in tangential velocity of C10H22 droplets inside the combustor. The main objective in these scenarios was to investigate how the combustion process behaves in the region where NO_x generation and temperature distribution are at their peak. The primary zone of combustion is noted for its high temperatures and powerful chemical reactions that underline the necessity of knowing how spinning droplets effect the flame properties, emission generation, and overall combustion dynamics.

In contrast to that, the fourth, fifth, and sixth cases investigated how the radial injection velocity of C10H22 droplets impacts the combustion process and emission formation in the primary zone of combustion. In other words, we investigated in these 3 cases how liquid fuel droplets are distributed within the combustor and affect mixing efficiency and flame characteristics, including the formation of NO_x and CO.

Results and discussion for the Temperature distribution, NO_x and CO formation

Fig. 5 a. (Temperature distribution at X = 0.04 m): The temperature distribution in the combustor's primary zone varies noticeably between the six scenarios. Due to less effective combustion and weaker fuel-air mixing, the first example has the lowest temperature (1377K). The temperature increases dramatically in the later cases, especially in the third and sixth examples, as the tangential and radial velocities grow. In the sixth case, the temperature reaches 1808K. Higher velocities boost mixing, which encourages more thorough burning and produces a hotter flame in the primary zone's core, which is the reason for this rise. The second, fourth, and fifth intermediate examples exhibit temperatures ranging from 1576K to 1656K, demonstrating the rising effect of higher droplet velocities.

Fig. 5 b. (Temperature distribution at X = 0.07 m): At this axial location, there are still noticeable changes in the flame core temperature, but the distribution of temperatures along the combustor wall becomes more consistent. The maximum core temperature in the first case is 1815K, and the highest temperature in the sixth case is 1960K. The core temperature indicates the strength of the combustion process, while the homogeneity around the walls is a sign of stable heat transport. Better fuel-air mixing and greater flame temperatures in the core are the results of the later cases' higher tangential and radial velocities, particularly in the third and sixth examples.

Fig. 5 c. (Temperature distribution at X = 0.12 m): As the flow progresses, the temperature differences between the six cases diminish. The fluctuation is minimal, with temperatures ranging from 1985K in the first case to 2010K in the third and sixth cases. This indicates that the combustion process has largely stabilized, with the flame maintaining a high and consistent temperature. The reduced variation suggests that the fuel has been mostly consumed, and the combustion process is nearing completion.

Fig. 5 d. (Temperature distribution at X = 0.15 m): By this axial position, the temperature fluctuations among the cases remain minimal, as in Fig. 5 c. The temperatures range from 1978K in the third case to 2005K in the first and sixth cases. This consistency reflects the complete combustion occurring by this point, where the fuel is almost fully oxidized, and the temperature stabilizes throughout the chamber.

Fig. 6 a. (NO distribution at X = 0.04 m): The NO distribution at the primary zone of combustion corresponds to the temperature fluctuations illustrated in Fig. 5a. The first case has the lowest NO concentration (8.43 ppm), which correlates with its reduced flame temperature. With the increase in tangential and radial velocities in the successive cases, NO production escalates markedly, culminating in the sixth scenario at 26.24 ppm. This is because NO generation, particularly thermal NO_x, is extremely temperature-dependent, and the higher temperatures in the later situations promote more NO formation in the flame core.

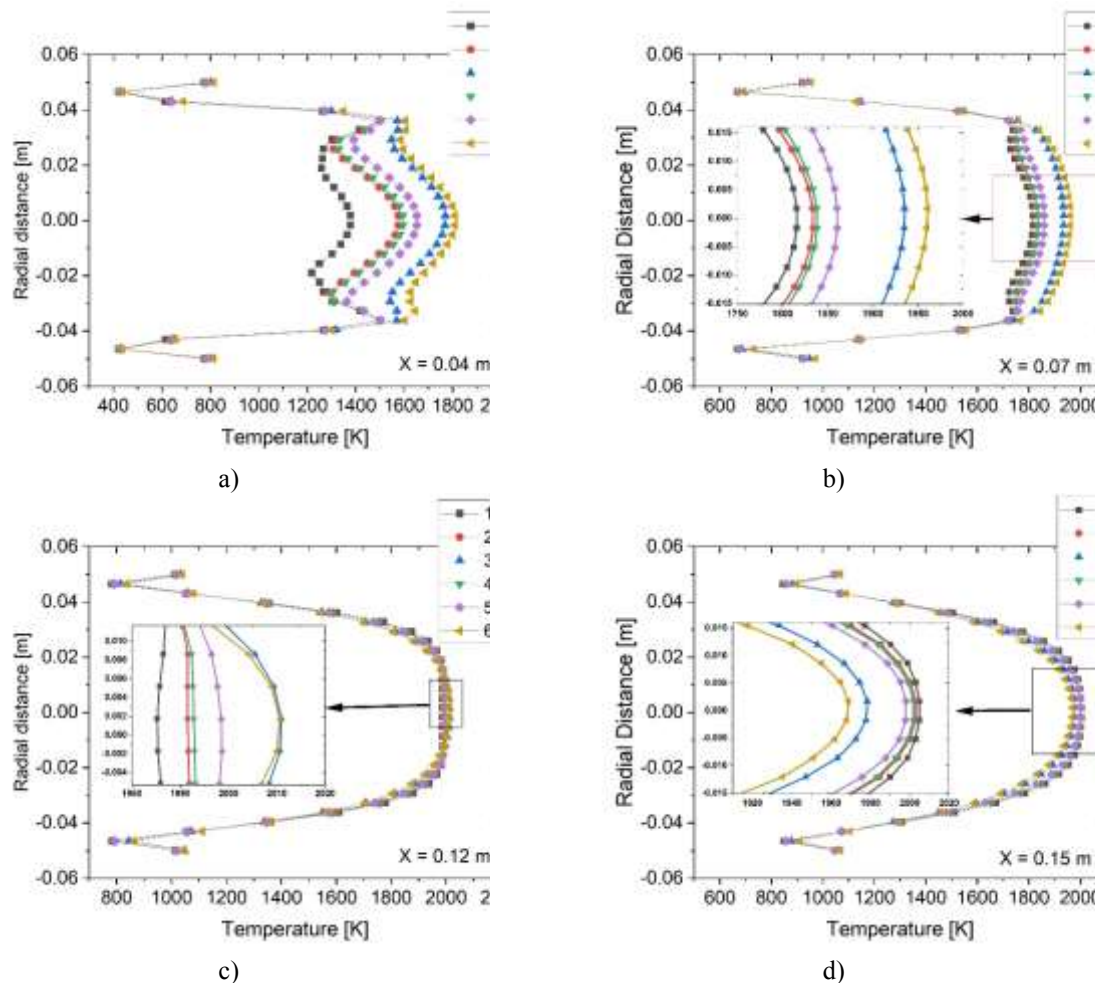


Figure 5 – Temperature distribution in various location of the combustor for various cases

Fig. 6 b. (NO distribution at X = 0.07 m): At this point, NO formation increases substantially compared to X = 0.04 m. The first case has a maximum NO concentration of 13.67 ppm, while the sixth case peaks at 39.71 ppm. The increase in NO is driven by the higher temperatures at this axial position, as shown in Fig. 5 b, and the prolonged exposure of the flame to high temperatures. The third and sixth cases, which have the highest flame temperatures, naturally produce the most NO.

Fig. 6 c. (NO distribution at X = 0.12 m): By X = 0.12 m, the NO levels continue to rise, with the sixth case reaching a peak of 67.7 ppm, while the first case remains at 37.8 ppm. The increased NO formation is a result of sustained high temperatures in this region, as indicated by the temperature distribution in Fig. 5 c. The next cases, with their higher initial droplet velocities and better fuel-air mixing, produce more NO due to the extended time the flame spends at elevated temperatures.

Fig. 6 d. (NO distribution at X = 0.15 m): At the last location, the NO level remains high, with the first case at 56.84 ppm and the sixth case at 67 ppm. The slight drop in NO from X = 0.12 m to X = 0.15 m in some cases suggests that NO formation has slowed as the combustion process nears completion. However, the high NO concentrations across all cases reflect the sustained high temperatures in the flame core, as seen in Fig. 5 d.

Fig. 7 a. (CO distribution at X = 0.04 m): According to the CO distribution, the greatest mass fraction in the first, second, and third examples is 0.086, 0.089, and 0.087, respectively, resulting in quite high CO concentrations in the flame core. The greater CO in these circumstances is a symptom of incomplete combustion, where insufficient oxygen hinders the entire oxidation of carbon to CO₂. The fourth, fifth, and sixth examples show a minor decrease in CO mass fractions as the radial velocity increases; the sixth case, in particular, reaches a minimum of 0.085, indicating more efficient burning and less CO generation.

Fig. 7 b. (CO distribution at X = 0.07 m): CO concentrations start to decrease as burning continues. The CO mass fraction in the first case is still somewhat high at 0.098, but it is lower in the third and sixth cases at 0.077 and 0.069, respectively. The higher temperatures in Fig. 5 b, are indicative of enhanced combustion efficiency at this axial point, which is responsible for the decrease in CO. The greater droplet velocities appear to facilitate more thorough combustion, generating more CO₂ from CO, as evidenced by the lower CO levels in the latter examples.

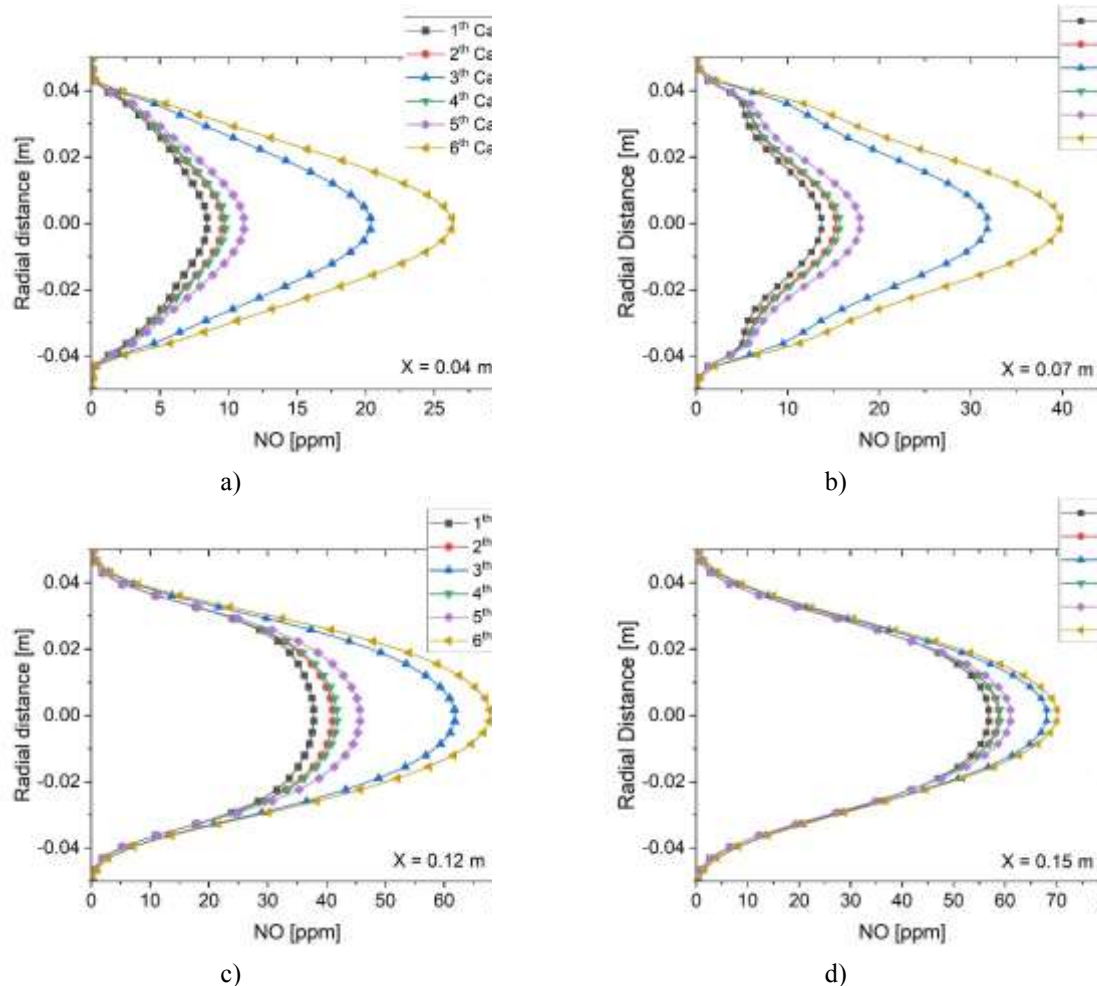


Figure 6 – NO distribution in various location of the combustor for various cases

Fig. 7 c. (CO distribution at X = 0.12 m): In every case, CO levels have decreased noticeably by this point. The CO mass percent in the first case is 0.062, and the lowest value is 0.03 in the sixth case. The nearly full combustion that is taking place in the chamber at this moment is reflected in the rapid decrease in CO since the flame has reached steady, high temperatures, thoroughly oxidizing the fuel. The higher temperature and improved fuel-air mixing in the latter situations correlate with the decreased CO production.

Fig. 7 d. (CO distribution at X = 0.15 m): At this final location, CO concentrations continue to decrease, with the sixth case exhibiting the lowest mass fraction of 0.016, and the first case showing a higher value of 0.037. By this moment, the combustion process is essentially complete, and CO levels are at their lowest. The little CO formation across all scenarios implies efficient combustion and the complete oxidation of carbon to CO₂. The lower CO levels in the third and sixth cases imply that the greater droplet velocities lead to better mixing and combustion efficiency, minimizing incomplete combustion and consequently CO generation.

Droplet penetration and its impact on combustion dynamics and emissions

In this study, droplet penetration behavior, as illustrated in Fig. 8 a to f for the first through sixth cases, is crucial in defining combustion parameters such as evaporation rates and flame stability. In the first example, droplet penetration is limited, which means that the droplets evaporate quickly after entering the combustion chamber. This quick evaporation causes a more limited and focused combustion process, resulting in lower temperatures, a smaller flame front, and less NO_x generation, as seen in the temperature and NO distribution figures. In comparison, the second and fourth cases show modest droplet evaporation and penetration. In these circumstances, the droplets go deeper into the combustion chamber before evaporating, allowing for a more evenly dispersed combustion process. This results in a more balanced temperature distribution and moderate NO_x generation. The droplets travel a greater distance than in the first scenario, but they remain inside the core of the flame zone, allowing for successful burning without considerable contact with the combustor walls.

The third, fifth, and sixth cases exhibit maximal droplet penetration and evaporation, with droplets going the greatest distance before entirely evaporating. In certain circumstances, the droplets approach or even strike the combustor internal wall surfaces, resulting in concerns such as wall film development or lower combustion efficiency near the walls. This increased travel distance results in a longer flame front, which leads to higher

temperatures and greater NO_x generation, as seen by the higher NO and temperature distribution. Furthermore, in certain cases, contact with the combustor walls might cause localized hotspots and greater emission levels, notably of CO, owing to incomplete combustion along the walls.

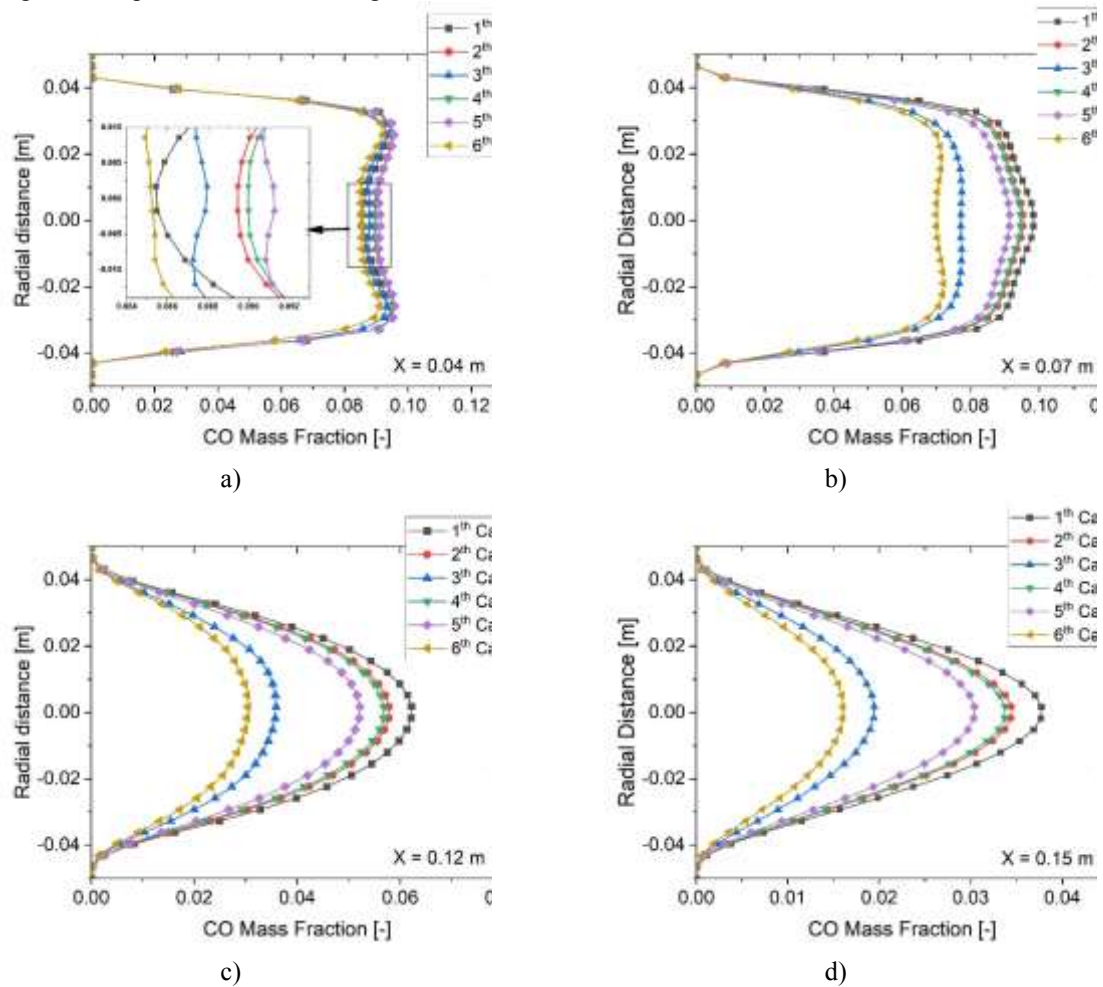


Figure 7 – CO distribution in various location of the combustor for various cases

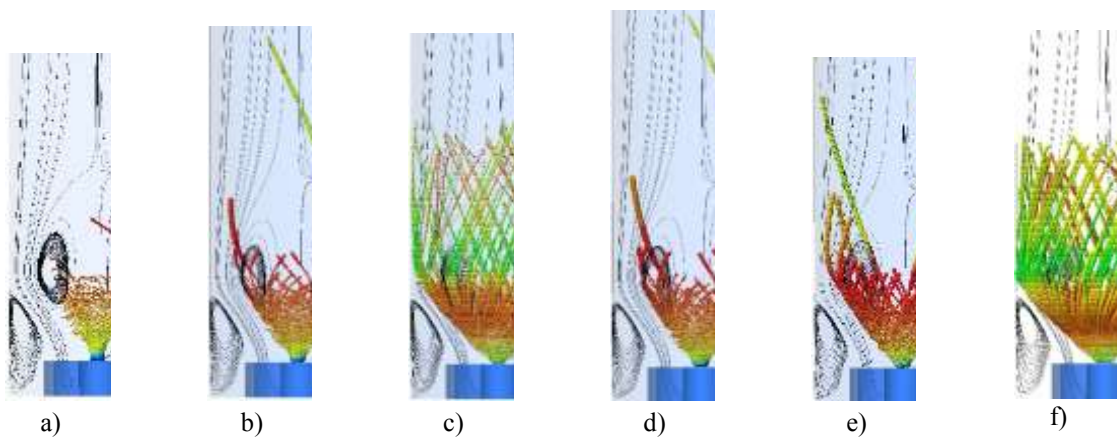


Figure 8 – Droplet penetration in to combustor for various cases;
 a) First case b) Second case c) Third case d) Fourth case e) Fifth case f) Sixth case

The change in droplet penetration across all cases demonstrates how droplet behavior directly effects combustion dynamics, flame structure, and emission production in the combustion chamber. The combustion process may be optimized and undesirable emissions like NO_x and CO reduced by regulating droplet injection parameters such as velocity and evaporation characteristics.

Investigation of the Temperature, NO and CO formation contour for the first and sixth studied cases

Figures 9a and 9b present contour plots illustrating the temperature spread in the center plane of the combustors for the first and sixth scenarios, respectively. In Figure 9a, the situation shows a lower temperature distribution around the fuel injection center and the central recirculation zone (CRZ). This indicates that in first case there is fuel evaporation and combustion due to reduced penetration and evaporation resulting in diminished heat release in these specific regions.

In comparison to Fig. 9b, the sixth situation depicted an uptick in temperature in these areas. The temperature rise could be linked to penetration that allows for a greater amount of fuel to reach the core and CRZ. This results in a combustion process and higher heat output. The differences in temperature spread between the two scenarios suggest that greater radial and tangential speeds in the scenario enhance evaporation and combustion strength, leading to a more effective energy release.

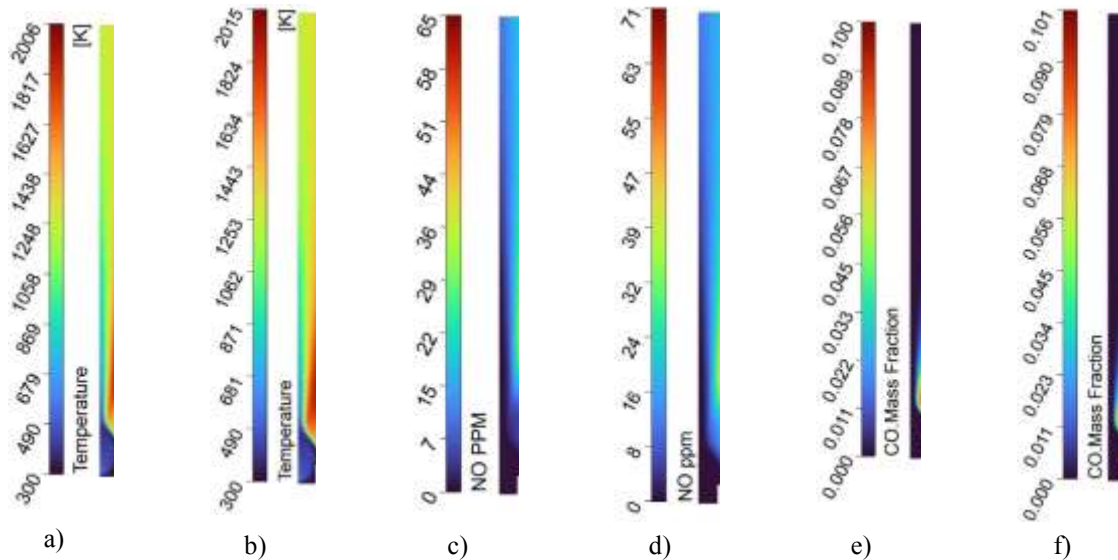


Figure 9 – The contour plots of the first and sixth cases; a) Temperature distribution in the first case b) Temperature distribution in the sixth case c) NO distribution in the first case d) NO distribution in the sixth case e) CO distribution in the first case f) CO distribution in the sixth case

The NO distribution for the first scenario in Fig. 9c shows comparatively lower NO concentrations in the vicinity of the combustor's center plane. This reduced production of NO is consistent with the temperature distribution seen in Fig. 9a, where there is a noticeable decrease in temperature near the fuel injection center and the central recirculation zone (CRZ). Lower temperatures, which restrict the thermal NO_x generation process, are thought to be the cause of the first case's decreased NO formations. On the other hand, the NO distribution for the sixth example, where the NO concentrations are noticeably larger than those of the first case, is depicted in Fig. 9d. The higher temperatures shown in Fig. 9b are correlated with this increase in NO production. The sixth case's greater temperatures promote the thermal NO_x generation, which raises NO concentrations in the same regions as the temperature. The close correlation between temperature and NO production is highlighted by this comparison. As demonstrated in the sixth example, higher temperatures cause more NO to develop, but lower temperatures cause less NO to be released, as demonstrated in the first example.

The CO distribution contour plots for the first and sixth cases are displayed in Figs. 9e and 9f. The contour plot in Fig. 9e, which shows the CO distribution for the first scenario, shows lower CO concentrations in the area surrounding the combustor's center plane. This outcome is consistent with the reduced NO levels in Fig. 9c and the lower temperatures seen in Fig. 9a. In the first case, where the lower temperature and shorter primary combustion zone lead to less CO formation, the lower CO levels point more thorough combustion and effective oxidation processes. Besides that, Fig. 9f displays the CO distribution for the sixth scenario, wherein elevated NO levels, as illustrated in Fig. 9d, and higher CO concentrations are visible in the same regions where the temperature is higher, as indicated in Fig. 9b. In areas with higher temperatures and longer droplet penetration, incomplete combustion and reduced oxidation efficiency can be blamed for the increased CO formation in the sixth example. This shows that although greater temperatures cause more NO to develop, they also raise CO levels because of less complete combustion in those areas. This CO distribution analysis demonstrates how temperature and combustion efficiency interact. If the combustion process is not optimized for complete oxidation, greater temperatures can increase CO emissions in addition to NO generation. On the other hand, as the first example illustrates, lower temperatures and shorter droplet penetration lead to less CO production, which denotes more thorough burning.

Conclusion

This paper investigates how temperature distribution within a gas turbine combustor and NO_x and CO emissions are affected by changing the radial and tangential injection velocities of kerosene droplets. The study analyzes six different scenarios with varying injection velocity components using CFD simulations with ANSYS CFX with the goal of comprehending how these factors affect flame stability, heat distribution, and the formation of harmful emissions.

The main conclusions show that injected kerosene droplets with higher radial and tangential velocities greatly improve fuel-air mixing and, consequently, increase combustion efficiency. Higher core temperatures within the combustion zone are indicative of a more stable and intense flame produced by this improved mixing. Temperatures up to 1960K were reached in situations with higher droplet velocities, which encouraged more complete combustion and a more even temperature distribution throughout the combustor.

It was discovered that NO_x emissions, especially thermal NO_x, were highly temperature-dependent. NO_x formation increased along with the droplet velocities, which raised the combustion temperature. The study highlighted the direct relationship between temperature and NO_x production by showing that the scenarios with the highest flame temperatures also had the highest NO_x concentrations. For example, NO_x concentrations at the furthest axial position reached 67 ppm in the highest velocity case.

The relationship between CO emissions and combustion efficiency was inverse. Due to inadequate fuel-air mixing, incomplete combustion produced higher CO emissions in situations with lower droplet velocities. More complete combustion happened as the injection velocities increased, which resulted in a notable drop in CO levels. In the highest velocity case, CO emissions were reduced to a mass fraction of 0.016 at the end of combustion, indicating very effective fuel oxidation.

The accuracy of the simulations is established by validating the CFD model with experimental data, which is a critical component of the study. The results are given more credibility by the comparison with earlier studies, which shows that the CFD model can accurately predict the temperature distribution and formation of NO_x in the combustor. The consistency between the experimental and simulated data highlights how reliable the numerical techniques used were.

The study's conclusion demonstrates that kerosene droplet injection velocities can be optimized to have a substantial impact on emission levels and the combustion process. Better mixing and more thorough combustion are facilitated by higher radial and tangential velocities, which lower CO emissions. There is a trade-off between increasing combustion stability and reducing NO_x emissions, though, as higher combustion temperatures lead to an increase in NO_x formation. Thus, it is essential to strike the ideal droplet velocity balance in order to reduce harmful emissions while preserving stable and effective combustion. This study emphasizes how crucial it is to precisely regulate fuel injection settings in gas turbine engines in order to comply with environmental standards and achieve operational performance objectives.

References:

1. Hajivand, M., & Dolmatov, D. A. (2021). NUMERICAL ANALYSIS OF KEROSENE SPRAY COMBUSTION IN VARIOUS INJECTION PREPARATIONS AND EMISSION BEHAVIOUR ASSESSMENT. Collection of Scientific Publications NUS, 1, 125–141. [https://doi.org/10.15589/znp2021.1\(484\).18](https://doi.org/10.15589/znp2021.1(484).18)
2. Rink, K. K., & Lefebvre, A. H. (1989b). The Influences of Fuel Composition and Spray Characteristics on Nitric Oxide Formation. *Combustion Science and Technology*, 68(1–3), 1–14. <https://doi.org/10.1080/00102208908924066>
3. Kankashvar, B., Tabejamaat, S., EidiAttarZade, M., Sadatakhavi, S. M., & Nozari, M. (2021a). Experimental study of the effect of the spray cone angle on the temperature distribution in a can micro-combustor. *Aerospace Science and Technology*, 115, 106799. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106799>
4. Dafsari, R. A., Lee, H. J., Han, J., & Lee, J. (2019). Evaluation of the atomization characteristics of aviation fuels with different viscosities using a pressure swirl atomizer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 145, 118704. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118704>
5. Lefebvre, A. H., & McDonell, V. G. (2017b). Atomization and Sprays. In *CRC Press eBooks*. <https://doi.org/10.1201/9781315120911>
6. Bokhart, A. J. (n.d.). *An Investigation of the Spray Characteristics of Standard and Alternative Fuel Sprays from a Hybrid Airblast Pressure-Swirl Atomizer Operating at Lean Blowout and Chilled Conditions Using Phase Doppler Anemometry*. Purdue e-Pubs. https://docs.lib.purdue.edu/open_access_theses/1255
7. Bishop, K., & Allan, W. (2010b). Effects of Fuel Nozzle Condition on Gas Turbine Combustion Chamber Exit Temperature Distributions. *Volume 2: Combustion, Fuels and Emissions, Parts a and B*. <https://doi.org/10.1115/gt2010-23441>
8. Lin, B., Wu, Y., Xu, M., & Chen, Z. (2021). Experimental investigation on spark ignition and flame propagation of swirling kerosene spray flames. *Fuel*, 303, 121254. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121254>

9. Ghose, P., & Datta, A. (2020). Effect of Inlet Swirl and Turbulence Levels on Combustion Performance in a Model Kerosene Spray Gas Turbine Combustor. In *Lecture notes in mechanical engineering* (pp. 493–504). https://doi.org/10.1007/978-981-15-7831-1_46
10. Alsulami, R., Windell, B., Nates, S., Wang, W., Won, S. H., & Windom, B. (2019). Investigating the role of atomization on flame stability of liquid fuels in an annular spray burner. *Fuel*, 265, 116945. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116945>
11. Fathinia, F., Khiadani, M., & Al-Abdeli, Y. M. (2019). Experimental and mathematical investigations of spray angle and droplet sizes of a flash evaporation desalination system. *Powder Technology*, 355, 542–551. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.081>
12. Gong, J., & Fu, W. (2007). The experimental study on the flow characteristics for a swirling gas–liquid spray atomizer. *Applied Thermal Engineering*, 27(17–18), 2886–2892. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.04.006>
13. Peters, N. (2000b). *Turbulent Combustion*. Cambridge University Press <https://doi.org/10.1017/cbo9780511612701>
14. Li, Q., Zhang, P., Feng, Y., & Wang, P. (2015). Implementation variations of adiabatic steady PPDF flamelet model in turbulent H₂/air non-premixed combustion simulation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 6, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2015.10.001>
15. CFX. *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide*, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA, Release 18.2
16. CFX. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA, Release 18.2
17. Pohl, S., Jarczyk, M., Pfitzner, M., & Rogg, B. (2013). Real gas CFD simulations of hydrogen/oxygen supercritical combustion. *Progress in Propulsion Physics*. <https://doi.org/10.1051/eucass/201304583>
18. Zimmermann, I. (2009). *Modeling and Numerical Simulation of Partially Premixed Flames* [Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik]. <http://athene.forschung.unibw.de/node?id=86289>
19. Golder, S., & Doom, J. J. (2017b). Simulation of an ethylene flame with turbulence, soot and radiation modeling. *55th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. <https://doi.org/10.2514/6.2017-0540>
20. Modest, M. F. (2013b). Radiative Heat Transfer. In *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/c2010-0-65874-3>
21. Höglauer, C., Kniesner, B., Knab, O., Schlieben, G., Kirchberger, C., Silvestri, S., & Haidn, O. J. (2015). Modeling and simulation of a GOX/kerosene subscale rocket combustion chamber with film cooling. *CEAS Space Journal*, 7(4), 419–432. <https://doi.org/10.1007/s12567-015-0096-y>
22. Strokach, E. A., Borovik, I. N., Bazarov, V. G., & Haidn, O. J. (2020). Numerical study of operational processes in a GOx-kerosene rocket engine with liquid film cooling. *Propulsion and Power Research*, 9(2), 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2020.04.004>
23. Ghose, P., Datta, A., & Mukhopadhyay, A. (2015). Effect of Prediffuser Angle on the Static Pressure Recovery in Flow Through Casing-Liner Annulus of a Gas Turbine Combustor at Various Swirl Levels. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 8(1). <https://doi.org/10.1115/1.4030734>
24. Ranz, W. E. ., & Marshall, W. R (1952). Evaporation from drops: Part II. *Chemical Engineering Progress*, 48, 173–180. <http://ci.nii.ac.jp/naid/10020503031>
25. Warnatz, J., Maas, U., & Dibble, R. (2006). *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-45363-5>
26. Jiang, B., Liang, H., Huang, G., & Li, X. (2006). Study on NO_x Formation in CH₄/Air Jet Combustion. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 14(6), 723–728. [https://doi.org/10.1016/s1004-9541\(07\)60002-0](https://doi.org/10.1016/s1004-9541(07)60002-0)
27. Yang, X., He, Z., Qiu, P., Dong, S., & Tan, H. (2019). Numerical investigations on combustion and emission characteristics of a novel elliptical jet-stabilized model combustor. *Energy*, 170, 1082–1097. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.189>
28. Bauer, H. J., Eigenmann, L., Scherrer, B., & Wittig, S. (1995). Local Measurements in a Three Dimensional Jet-Stabilized Model Combustor. *Volume 3: Coal, Biomass and Alternative Fuels; Combustion and Fuels; Oil and Gas Applications; Cycle Innovations*. <https://doi.org/10.1115/95-gt-071>
29. Kurreck, M., Willmann, M., & Wittig, S. (1998). Prediction of the Three-Dimensional Reacting Two-Phase Flow Within a Jet-Stabilized Combustor. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 120(1), 77–83. <https://doi.org/10.1115/1.2818090>
30. Bazdidi-Tehrani, F., & Zeinivand, H. (2010). Presumed PDF modeling of reactive two-phase flow in a three dimensional jet-stabilized model combustor. *Energy Conversion and Management*, 51(1), 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.09.020>
31. Zeinivand, H., & Bazdidi-Tehrani, F. (2012). Influence of stabilizer jets on combustion characteristics and NO_x emission in a jet-stabilized combustor. *Applied Energy*, 92, 348–360. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.033>

32. Bazdidi-Tehrani, F., & Teymoori, A. (2022). Optimization of a gas turbine model combustor due to variations in geometrical characteristics of stabilizing air jets. *Applied Thermal Engineering*, 217, 119206. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119206>

33. Alemi, E., & Zargarabadi, M. R. (2017). Effects of jet characteristics on NO formation in a jet-stabilized combustor. *International Journal of Thermal Sciences*, 112, 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.10.001>

34. Ghose, P., Patra, J., Datta, A., & Mukhopadhyay, A. (2016). Prediction of soot and thermal radiation in a model gas turbine combustor burning kerosene fuel spray at different swirl levels. *Combustion Theory and Modelling*, 1–29. <https://doi.org/10.1080/13647830.2016.1147607>

35. Ghose, P., Patra, J., Datta, A., & Mukhopadhyay, A. (2014). Effect of air flow distribution on soot formation and radiative heat transfer in a model liquid fuel spray combustor firing kerosene. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 74, 143–155. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.001>

М. Хаджіванд¹, аспірант; ORCID 0000-0002-9990-9761

Д. Долматов¹, д-р техн.наук; ORCID 0000-0002-7268-1509

¹Національний аерокосмічний університету ім. Н.С. Жуковського «ХАІ»

ВПЛИВ ІН'ЄКЦІЇ КРАПЕЛЬ РІДКОГО КЕРОСИНУ ПРИ РІЗНИХ РАДІАЛЬНИХ ТА ТАНГЕНЦІЙНИХ ШВИДКОСТЯХ НА УТВОРЕННЯ NO_x, CO ТА РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРИ

У цьому дослідженні представлено числовий аналіз і CFD-моделювання згоряння рідкого керосину шляхом варіювання радіальних і тангенціальних складових швидкості крапель керосину, інжектованих через форсунку в реальній камері згоряння. Краплі розглядаються через розподіл розмірів частинок за Розіном-Раммлером з використанням моделі розпилення Ейлера-Лагранжа. Основною метою цього дослідження є оцінка процесів утворення викидів, таких як NO і CO, а також коливань розподілу температури в зоні первинного згоряння під час процесу горіння та випаровування крапель. Для моделювання горіння випареного керосину було використано модель Flamelet, яка дозволяє детально описати кінетичну схему хімічних реакцій між (JetA-C10H22) і повітрям, інтегровану в ANSYS CFX, включаючи термічне та швидке утворення NO. Було застосовано стандартну модель турбулентності k-ε з покращеним описом стінок і моделлю випромінювання P1. Верифікація та валідація результатів аналізу були розглянуті в цьому дослідженні, де результати, такі як розподіл температури та утворення NO на різних радіальних відстанях камери згоряння, порівнювалися з реальними експериментальними даними. Результати показали, що поведінка крапель, зумовлена швидкостями інжекції, значно впливає на процес згоряння, включаючи розподіл температури, утворення NO_x та викиди CO, особливо в зоні первинного згоряння.

Ключові слова: CFD, згоряння, розпилення, викиди, спрей, випаровування крапель, флеймлет.

Надійшла: 25.09.2024

Received: 25.09.2024

USE OF GEO-INFORMATION SYSTEMS FOR GROUNDWATER MONITORING

Abstract . The article is devoted to the study of the possibilities of using geographic information systems (GIS) for monitoring the state of groundwater, which is important for ensuring environmental safety and sustainable management of water resources. Groundwater is an important source of fresh water for the population, industry and agriculture, but it is vulnerable to various pollutions caused by both natural and anthropogenic factors. Therefore, the implementation of reliable monitoring systems that allow timely detection, assessment and forecasting of changes in water quality is necessary to prevent the deterioration of the ecological situation and prevent the spread of pollution.

Geographic information systems (GIS) offer significant opportunities for the collection and integration of large volumes of spatial data, including satellite images, remote sensing results, automated sensor data, and field observations. GIS allow creating multi-layered maps reflecting the ecological state of underground aquifers, modeling pollution processes and predicting their possible impact on nearby ecosystems and water sources. Thanks to the use of GIS, it is possible to combine data from different sources in a single interactive system, which simplifies analysis and provides the ability to quickly respond to any detected deviations.

The article examines in detail the key methods used within GIS for groundwater monitoring, including satellite sounding to analyze changes in the earth's surface, spectral indices to assess the state of vegetation and soil salinity, and radar methods to determine soil electrical conductivity. Particular attention is paid to the application of three-dimensional modeling, which allows visualization of the spread of pollution in underground aquifers, which facilitates decision-making regarding the optimal location of monitoring stations and the design of protective structures. In combination with automated sensors recording water parameters in real time, GIS provides continuous monitoring of the physico-chemical indicators of groundwater and allows for prompt assessment of their condition.

The article also analyzes the possibilities of using predictive modeling in GIS to assess the further spread of pollution and develop environmental risk management measures. It is described how mathematical models in GIS can help predict the impact of anthropogenic and natural factors on groundwater, which ensures the development of scientifically based solutions to reduce pollution and maintain water quality at a safe level. The implementation of GIS in groundwater monitoring is an important step towards increasing the efficiency of water resources management, ensuring their protection from pollution and preserving the ecological stability of the regions.

Keywords: geoinformation systems, groundwater monitoring, environmental safety, satellite sounding, automated sensors, three-dimensional modeling, predictive modeling, water resources management, aquifer pollution.

Introduction . Groundwater monitoring is a key element for ensuring ecological stability and sustainable management of water resources, especially in regions with increased anthropogenic activity. In industrial and mining areas where the level of contamination can change rapidly due to leaks, increased mineralization or contamination with toxic substances, groundwater monitoring is critically important. Thus, on the territory of the Dombrovsky quarry, the accumulation of brines creates an ecological threat to aquifers, which emphasizes the need for highly accurate and integrated systems for monitoring the state of groundwater.

Geographic Information Systems (GIS) provide an integrated approach to groundwater monitoring by providing the ability to collect, store, analyze and visualize a variety of environmental data from a variety of sources. The use of these systems allows detecting changes in the state of groundwater, assessing the degree of contamination, predicting the dynamics of contamination, and creating models that reflect the interaction between contaminated zones and aquifers. GIS programs, such as ArcGIS and QGIS, are capable of processing large volumes of spatial data, which allows you to quickly obtain information about the state of aquifers and make effective management decisions to protect water resources.

The application of GIS includes the use of satellite sounding, remote sensing data, and spectral indicators that allow us to assess the state of surface and groundwater in large areas. An important aspect is the creation and analysis of thematic maps, which provide a reliable representation of the ecological situation. For example, maps

that display the salinity level or the chemical composition of groundwater help to investigate areas with increased levels of pollution and develop measures to minimize their impact on the ecosystem.

Modern geoinformation systems also support the creation of three-dimensional models of aquifers, which allows you to explore not only the plane, but also the deep aspects. Such 3D models make it possible to estimate the depth of the contaminated layers, adjust the optimal points for installing monitoring stations, and more accurately predict the movement of contaminants in aquifers. The use of mathematical models ensures the creation of forecasts regarding the further spread of pollution under the influence of natural and man-made factors, which is a case for timely use of measures to prevent environmental damage.

Thus, the implementation of a geo-information system for groundwater monitoring not only ensures the accuracy and efficiency of obtaining environmental information, but also contributes to more effective management of natural resources. GIS technologies are a tool for specialists in the field of ecology and water resources, which should ensure long-term environmental security of regions with a high risk of groundwater pollution.

Purpose and task. The purpose of the research is to provide effective monitoring of the state of groundwater using geoinformation systems for timely detection and forecasting of pollution. The task of the work is the study of GIS methods that contribute to the detection, analysis and visualization of groundwater data, as well as the assessment of their application for building models and making decisions in the field of water resources protection.

Presentation of the main research material. Today, geographic information systems (GIS) are one of the most effective tools for monitoring the ecological state of groundwater. Thanks to these systems, it is possible to integrate and analyze data from various sources, visualize the dynamics of changes and predict possible scenarios of the spread of pollution in aquifers. It allows you to create multi-layered maps and models that help assess the state of groundwater and the interaction between various environmental factors that affect their quality and quantity.

Geographic information systems (GIS) are indispensable in groundwater monitoring due to their ability to integrate, analyze and visualize large volumes of data that cover the physical and chemical characteristics of groundwater, the ecological status of regions, the level of damage, and spatial and temporal changes in ecosystems. The use of GIS contributes to greater accuracy, efficiency and systematic environmental control, providing the possibility of making informed decisions for the protection of water resources [1].

First, there is the possibility of collecting and processing large volumes of data from various sources, such as satellite images, sensors, field studies and automated monitoring stations. This data may include information on salinity levels, concentrations of toxic substances, water conductivity, temperature, and other parameters that affect groundwater quality. The integration of such data into a single system makes it possible to maintain a comprehensive picture of the state of waters in the selected territory. The use of satellite images allows monitoring of large areas and surface changes that may affect aquifers, such as landslides, changes in vegetation or aquifers, which are the result of both natural and anthropogenic factors.

In addition, GIS contribute to the identification of regularities and the analysis of spatial and temporal dynamics of pollution. The use of spatio-temporal data allows creating maps and models that reflect the dynamics of changes in groundwater at different time stages. This is especially important for monitoring areas with a high level of anthropogenic influence, such as industrial or mining areas. Regular monitoring of pollutant concentrations makes it possible to accidentally detect anomalous increases in pollution levels, which may indicate leaks or other sources of pollution, and to ensure a rapid response to environmental threats.

There is a huge potential for predictive modeling, which allows predicting how the state of groundwater will change under the influence of natural or man-made factors [2]. Predictive modeling can be used to assess different scenarios, for example, the deterioration of the ecological situation due to increased precipitation, changing climatic conditions or the expansion of industrial production. Based on such forecasts, experts can develop measures to prevent further deterioration of water quality, such as the construction of drainage systems, the creation of protective barriers or the installation of monitoring stations at key points.

Three-dimensional modeling, which is supported by GIS, allows visualization of the distribution of pollutants not only in the horizontal but also in the vertical dimension, providing a more detailed understanding of distribution at different depths. This makes it possible to determine the depth of the contaminated layers and their connection with fresh water horizons. This approach is especially valuable in regions with complex geological conditions, where surface and underground distribution can be significantly different [3].

It is possible to analyze the interrelationships of environmental factors, such as climatic conditions, the intensity of industrial production, the condition of the soil and vegetation, the degree of anthropogenic load on the territory. Such a comprehensive approach will make it possible to determine the main causes of pollution and develop effective measures to reduce them. They also provide an opportunity to quickly respond to environmental threats. Data from satellites, sensors, and field studies can quickly track abnormal changes, such as rising salinity

levels in a given area, that may indicate expanding water salinization. These systems can quickly analyze data, assess their impact on the environment and decide on preventive measures, such as installing temporary barriers or diverting water to prevent further impacts.

The use of modern approaches makes it possible to develop long-term environmental programs that take into account the peculiarities of a certain region, the dynamics of disturbance and environmental risks. On the basis of the obtained data, it is possible to plan measures to prevent pollution for many years ahead, such as the construction of protective structures, the implementation of water purification and desalination methods, and the installation of drainage systems to maintain water quality at a stable level [4].

GIS also facilitate an interdisciplinary approach and collaboration between higher scientific, public, and private institutions involved in groundwater monitoring. The use of a single platform allows different organizations to exchange data and coordinate their actions, which is especially important for large environmental projects that require the involvement of significant resources and specialists from various fields.

Information capabilities are widely used for training specialists in the field of ecology, hydrogeology and groundwater monitoring. Real data from various projects help to practically apply monitoring methods, improve skills in working with spatial data, and obtain up-to-date knowledge about predictive modeling and systematic management of natural resources [5].

Analyzing the data of the Dombrovsky quarry from the GIS system for 2015 (Fig. 1) and 2024 (Fig. 2), we can conclude about a significant increase in brines, marked in black in the photo as zones with high salinity. In the image for 2024, the amount black areas are much larger, indicating a high level of salinity [6]. This indicates an increase in the concentration of salts in underground and surface waters of the quarry.

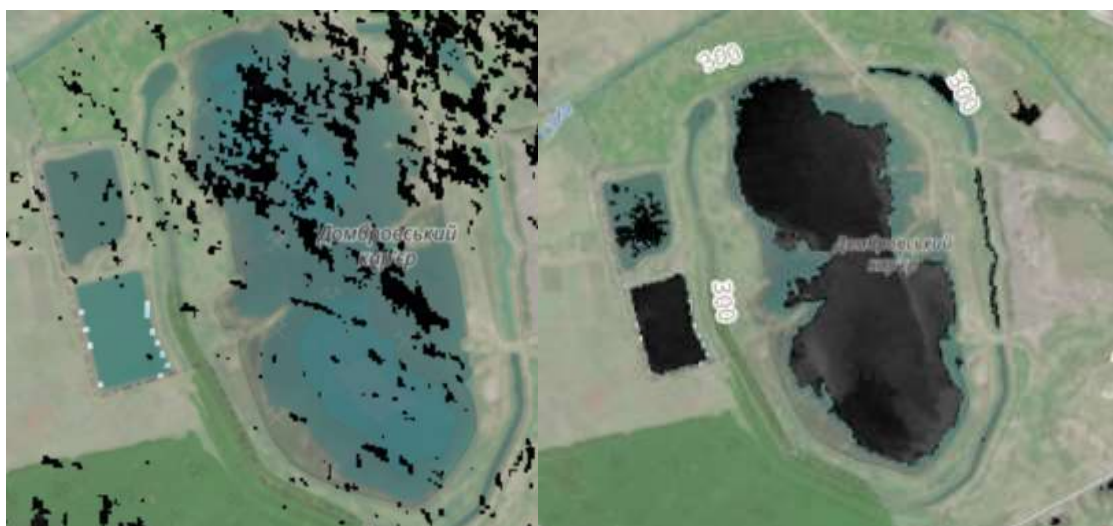


Figure 1 – Snapshot (2015) from Sentinel Hub Figure 2 – Snapshot (2024) from Sentinel Hub

Such a series of salinity levels is a serious signal of the aggravation of the problem of salinization of water resources in the region. The spread of brines can lead to ecosystem degradation, as high salt concentrations negatively affect vegetation and soil, making the area unsuitable for many species of flora and fauna. In addition, such changes can cause the migration of contaminated water into nearby aquifers, which threatens the quality of drinking water for the surrounding areas.

Without the implementation of control measures and the construction of protective structures, the level of salinity in the Dombrovsky quarry and adjacent aquifers will increase. This is due to several factors:

1. Cumulative nature of the process. Salinity tends to accumulate, reducing the salt level in water is a very slow process. Accumulated salts will continue to accumulate in the lower horizons, seeping into the ground and aquifer layers.

2. Infiltration of salts into adjacent horizons. Over time, saltwater can begin to seep into nearby aquifers, increasing the extent and depth of contamination. This can cause water quality in the region to deteriorate, making it unfit for consumption and threatening ecosystems.

3. Increasing the risk of fresh water pollution. Since the Dombrovsky quarry is located close to other water bodies, there is a risk that, through capillary or underground processes, brines may penetrate into fresh water sources, which are connected for economic and drinking needs [7].

Based on the trends observed in the 2015 and 2024 images, it can be predicted that the area of saline areas will increase by 15-20% by 2030 if no protective measures are taken. This forecast is based on an analysis of current salinization dynamics and the maintenance of current infection rates.

In the longer term, without effective control, the salinization of aquifers can lead to serious environmental

consequences for the region:

1. Extension of sounding. Brines can penetrate aquifers that are currently completely protected. This will lead to a significant expansion of the zone with high salinity, which will make the area unsuitable for economic and agricultural use.

2. Negative impact on local ecosystems. An increase in soil and water salinity will negatively affect the state of local ecosystems, including degradation of vegetation and changes in biodiversity. Many plants and animals are unable to withstand high levels of salinity, which will lead to a decrease in the number and types of biodiversity depletion.

3. Risk of environmental disaster. If the salinization process is not stopped or isolated, the penetration of brines into aquifers of regional or global importance is possible. This will threaten not only local water sources, but may also have greater consequences for the adjacent regions of Ukraine and neighboring countries, such as Moldova, especially in conditions of a possible expansion of production works [8].

GIS data play an extremely important role in the process of monitoring and minimizing the risks of groundwater salinization. Thanks to the ability to process and analyze a large amount of spatial data, GIS allows specialists to create interactive maps, predictive models and monitoring systems that help to quickly monitor changes in the state of aquifers and respond to some threats.

The main ways of using GIS to minimize the risks of salinity are as follows.

1. Constant monitoring and periodic detection of changes.

GIS provides the possibility of regular monitoring of the state of groundwater and allows recording changes in salinity, levels of damage and other physicochemical parameters. The use of satellite images, automated sensors and ground observations allows for constant storage of updated data, which significantly increases the accuracy of assessing the current state of aquifers.

For example, with the help of regular analysis of GIS data, it is possible to detect the tendency of increasing salinity in a certain area in time. This allows for prompt decision-making, for example, regarding the installation of additional drainage systems to avoid the further spread of brines.

2. Use of 3D modeling to assess the spread of pollution.

Three-dimensional modeling in GIS is a powerful tool for studying the dynamics of the spread of pollutants in groundwater. With the help of 3D models, it is possible to visualize not only the horizontal, but also the vertical movement of brines, which clearly assesses the depth of their penetration and the impact on deep aquifers.

For example, in the case of the Dombrovskiy quarry, 3D modeling can be used to determine the places of the greatest accumulation of brines in deeper horizons, which allows obtaining risk points for fresh water. Thanks to such modeling, specialists can develop more effective strategies to stop or slow down the seepage of salts, in particular, to determine the optimal places for the construction of protective barriers.

3. Predictive modeling.

Using GIS mathematical models, it is possible to predict how the level of groundwater salinity will change in the future, depending on factors such as rainfall, temperature fluctuations, geological conditions and other factors.

For example, if forecast modeling shows that precipitation is expected to increase in the near future, this could contribute to further spread of brines. In such a case, based on the forecast, risk reduction measures such as expansion of the drainage system or strengthening of existing barriers can be planned in advance.

4. Optimizing the location of monitoring stations.

GIS data help to optimize the location of monitoring stations, which allows for more accurate control of the state of groundwater in different parts of the territory. Thanks to the analysis of thematic maps and 3D modeling, it is possible to determine the place with the highest concentration of pollution, where the installation of monitoring stations is most appropriate.

Optimum location of stations reduces monitoring costs and provides more accurate data that can better predict the spread of pollution.

5. Timely response to environmental threats.

Thanks to the data obtained from GIS, specialists can quickly respond to sudden changes in the state of groundwater, for example, to a sharp increase in the level of salinity or the emergence of new polluted areas. Using GIS, you can quickly analyze data, assess the impact of changes on the environment and make appropriate decisions.

GIS also allows for the creation of long-term monitoring and management programs that take into account environmental risks and allow planning activities for many years ahead. The use of historical data and models of salinity dynamics additionally allows specialists to develop forecasts and plan measures to prevent environmental disasters in the future.

Long-term planning based on GIS includes, for example, the construction of protective structures, the creation of complex drainage systems, the implementation of cleaning and desalination methods that minimize risks for the region and preserve water resources [9].

Conclusion. The implementation of geographic information systems (GIS) in groundwater monitoring is an extremely effective approach to ensuring environmental security and sustainable management of water resources. Modern capabilities allow for the integration of huge amounts of data, including satellite images, automated sensors and the results of field studies, into a single platform for comprehensive analysis of the state of groundwater. The use of GIS provides not only efficiency and accuracy in data collection, but also creates a tool for identifying dynamics and regularities in changes in water quality, especially in conditions of anthropogenic influence.

One of the key achievements of GIS is the possibility of creating thematic and three-dimensional maps that allow a deeper understanding of the spatial and temporal distribution of pollution in aquifers. Thanks to such maps, experts can not only identify current "hot spots" of pollution, but also predict potential risks that may arise in the future. For example, the use of 3D models helps to investigate how deeply polluted waters spread and to identify areas that require additional protection measures.

Predictive GIS-based modeling is another extremely important aspect that allows for the development of different scenarios for the development of the salinity situation. The inclusion of climatic and anthropogenic factors in the calculations makes it possible to build forecasts that take into account possible changes in natural conditions, such as an increase in the level of precipitation or changes in temperature, which can affect the salinity of aquifers. Such forecasts are the basis for creating long-term risk management strategies, developing measures to reduce the impact on ecosystems and ensure a stable state of groundwater.

Modern GIS also make it possible to create early warning systems that can detect changes in water parameters in real time. Such a system provides the ability to immediately respond to sudden changes in the state of groundwater, which is critical for preventing environmental disasters. This opens up prospects for more efficient management of water resources, especially in regions with a high level of anthropogenic load, such as the Dombrovsky quarry, where the risk of pollution is increased.

Using the example of Dombrovsky quarry monitoring for 2015 and 2024, it is possible to draw a conclusion about the effectiveness of the GIS system in studying the dynamics of brines, which shows an increase in the concentration of salts in the underground and surface waters of the quarry, which threatens the pollution of surface and underground waters in the environment. Based on the trends observed in the 2015 and 2024 images, it can be predicted that the area of saline areas will increase by 15-20% by 2030 if no protective measures are taken. The application of 3D modeling can be used to determine the places of the greatest accumulation of brines in deeper horizons, which allows to obtain points of risk for fresh water. Thanks to such modeling, it is possible to develop more effective strategies to stop or slow down the seepage of salts, to determine the optimal places for the construction of protective barriers.

Therefore, the implementation of GIS in groundwater monitoring is an important step on the way to ecologically balanced development. Geoinformation systems provide specialists in the field of ecology, hydrogeology and water resources management with an effective tool for analysis, forecasting and timely response to environmental challenges. The development and improvement of GIS technologies allows to increase the level of safety of water resources, providing a reliable basis for preserving ecological stability and protecting the quality of groundwater in the long term.

References

1. Geoinformation systems. Introductory course: teach . help /AND. D. Tevyashev , V. P. Tkachenko, M. I. Gubat and others. - Kh.: Khnure, 2017. - 392 p. – ISBN 966-659-238-8 .
2. KeyMethodsInGeography / N. Clifford , S. French , G. Valentine (Eds .).— SAGE, 2010.— 569 p.
3. ResearchMethodsInGeography : A Critical Introduction / B. Gomez , JP Jones (Eds .).— Blackwell Publishing , 2010.— 459 p.
4. Development plan for groundwater monitoring in Ukraine. EUWI+, 2021.
5. Kuzmenko, E. and others. The influence of man-made processes on the pollution of groundwater in the territory of the Dombrovsky quarry. Ukrainian Journal of Geodynamics, 2022, 32, p. 119–135.
6. *Copernicusbrowser.* (n.d.). Copernicus Browser. <https://browser.dataspace.copernicus.eu/?zoom=5&lat=50.16282&lng=20.78613&demSource3D=%22MAPZEN%22&cloudCoverage=30&dateMode=MOSAIC>
7. Salenko , V. G. Ecological bases of water resources management . Institute of Ecology and Management, 2017.
8. Shevchenko, O. Yu. Status and ways of reforming the state groundwater monitoring system taking into account international experience and the requirements of the Water Framework Directive of the European Union. Scientific journal "Management and Regulation", 2019, No. 2, p. 50–60.
9. N. Zuiavska T. Hrebenuk , Y. Zuiavskiy . Application of gis for analysis of environmental aspects of mineral deposits . Collection of Scientific Works of the National Mining University 75:7-17, December 2023 75:7-17 DOI: 10.33271/ crpnmu /75.007
10. N. Remez , V. Bronytskyi , T. Hrebenuk . Risk assessment for the development of the exemplified territories . Energy: economy, technologies, ecology. 2024. No. 1, ISSN 1813-5420, DOI 10.20535/1813-

5420.1.2024.300835

11. Zuyevska N.V., Grebenyuk T.V. Research of geocological conditions of mineral deposits using GIS. Theory and practice of the development of technical sciences, Abstracts of VI International Scientific and Practical Conference Prague, Czech Republic Republic (February 12-14, 2024). 335. R 126-129. ISBN – 9-789-40372-364-8

Т. В. Гребенюк¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-9287-2919

Р.М. Артёмов¹, студент

Н.С. Ремез¹, д-р техн. наук, проф.

В.О. Броницький¹, канд. техн. наук, доцент

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИКОРИСТАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ПІДЗЕМНИХ ВОД

Стаття присвячена вивченню можливостей використання геоінформаційних систем (ГІС) для моніторингу стану підземних вод, що має важливе значення для забезпечення екологічної безпеки та сталого управління водними ресурсами. Підземні води є важливим джерелом прісної води для населення, промисловості та сільського господарства, однак вони вразливі до різноманітних забруднень, спричинених як природними, так і антропогенними факторами. Тому впровадження надійних систем моніторингу, які дозволяють своєчасно виявляти, оцінювати та прогнозувати зміни якості води, є необхідним для запобігання погіршенню екологічної ситуації та запобігання поширенню забруднення.

Геоінформаційні системи (ГІС) відкривають значні можливості для збирання та інтеграції великих обсягів просторових даних, зокрема супутникових знімків, результатів дистанційного зондування, даних автоматизованих сенсорів та польових спостережень. ГІС дозволяють створювати багатошарові карти, що відображають екологічний стан підземних водоносних горизонтів, моделювати процеси забруднення і прогнозувати їх можливий вплив на прилеглі екосистеми та джерела води. Завдяки використанню ГІС можна поєднувати дані з різних джерел у єдиній інтерактивній системі, що спрощує аналіз і забезпечує можливість швидкого реагування на будь-які виявлені відхилення.

У статті докладно розглядаються ключові методи, які використовуються в рамках ГІС для моніторингу підземних вод, зокрема супутникове зондування для аналізу змін на поверхні землі, спектральні індекси для оцінки стану рослинності та солоності ґрунтів, а також радіолокаційні методи для визначення електропровідності ґрунтів. Особливу увагу приділено застосуванню тривимірного моделювання, яке дозволяє візуалізувати поширення забруднень у підземних водоносних шарах, що полегшує прийняття рішень щодо оптимального розташування моніторингових станцій та проектування захисних споруд. У поєднанні з автоматизованими сенсорами, що фіксують параметри води в режимі реального часу, ГІС забезпечує безперервний контроль за фізико-хімічними показниками підземних вод і дозволяє оперативно оцінювати їх стан.

Стаття також аналізує можливості застосування прогнозного моделювання у ГІС для оцінки подальшого поширення забруднення та розробки заходів з управління екологічними ризиками. Описано, як математичні моделі у ГІС можуть допомогти передбачити вплив антропогенних та природних факторів на підземні води, що забезпечує розробку науково обґрунтованих рішень для зменшення забруднення та підтримання якості води на безпечному рівні. Впровадження ГІС у моніторинг підземних вод є важливим кроком до підвищення ефективності управління водними ресурсами, забезпечення їх захисту від забруднень та збереження екологічної стабільності регіонів.

Ключові слова: геоінформаційні системи, моніторинг підземних вод, екологічна безпека, супутникове зондування, автоматизовані сенсори, тривимірне моделювання, прогнозне моделювання, управління водними ресурсами, забруднення водоносних горизонтів.

Надійшла: 09.11.2024

Received: 09.11.2024