

**Матеріали науково-технічної конференції
I НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА СПЕЦІАЛІСТІВ
ІНСТИТУТУ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ**

15 березня 2021

Павловський В.В.; Приходько А.В.; Савицький О.В.; Блінов І.В.;
Парус Є.В.; Берека В.О.; Панчик М.В.; Підчібій О.Є.;
Зайцев Є.О.; Березниченко В.О.; Філоменко А.А.;
Шиманюк П.В.; Мірошник В.О.; Губаревич В.М.; Маруня Ю.В.;
Кучанський В.В.; Малахатка Д.О.; Лоскутов С.С.; Сичова В.В.

Національна академія наук України

Інститут електродинаміки

Національної академії наук України



Матеріали науково-технічної конференції

**I НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА СПЕЦІАЛІСТІВ
ІНСТИТУТУ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ**

15 березня 2021



КИЇВ - 2021

УДК 621.3

Рекомендовано для розміщення на сайті Інституту (протокол № 3 засідання вченої ради ІЕД НАН України від 18.03.2021 р.).

Організаційний комітет:

Блінов І.В., Кучанський В.В., Березниченко В.О. та ін.

Програмний комітет:

Кучанський В.В., Березниченко В.О., Шиманюк П.В., Зайцев Є.О.

Відповідальні за випуск:

Кучанський В.В., Березниченко В.О.

Збірник матеріалів І науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту електродинаміки Національної академії наук України, м. Київ, 15 березня 2021 р. / Інститут електродинаміки Національної академії наук України. 2021. 64 с.

© Автори публікацій, 2021

© Інституту електродинаміки Національної академії наук України, 2021

ЗМІСТ

Зміст

Павловський В.В., Приходько А.В.

Застосування гнучких систем HVDC для інтеграції ВДЕ та видачі «чистої» енергії з півдня ОЕС України.....6

Савицький О.В.

Підвищення ефективності та надійності експлуатації магістральних електричних мереж керованими пристроями компенсації реактивної потужності9

Блінов І.В., Парус Є.В.

Аспекти впливу збільшення частки відновлювальних джерел енергії в балансі ОЕС України на вартість електричної енергії14

Берека В.О.

Визначення найефективнішої електророзрядної технології обробки води17

Панчик М.В.

Засоби визначення технічного стану осердя статора турбогенератора на основі аналізу теплового поля.....24

Підчібій О.Є.

Використання методу скінчених елементів для реалізації моделі компланарного ємнісного сенсору28

Зайцев Є.О.

Вимоги до засобів забезпечення ефективності контролю та діагностування осердя статора потужних генераторів30

Березниченко В.О.

Вимірвач биття циліндричних поверхонь валів гідрогенераторів із ємнісним компланарно концентричним сенсором33

Філоменко А.А.

Керування траєкторією ротора двигуна зворотно-обертального руху у розімкненій системі.....38

Шиманюк П.В., Мірошник В.О.

Виявлення та заміна аномальних значень в вихідних даних при прогнозуванні вузлового навантаження енергосистеми41

Губаревич В.М., Маруня Ю.В.

Вдосконалений Імс-фільтр в структурі однофазного гібридного фільтра на вході випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням.....44

Кучанський В.В., Малахатка Д.О.

Структурна оптимізація режимів роботи магістральних електричних мереж48

Сичова В.В.

Застосування методу гільберта-хуанга для декомпозиції графіків сумарного електричного навантаження52

Лоскутов С.С.

Онофакторне короткострокове прогнозування сумарного електричного навантаження на трьох ієрархічних рівнях ОЕС України55

ЗАСТОСУВАННЯ ГНУЧКИХ СИСТЕМ HVDC ДЛЯ ІНТЕГРАЦІЇ ВДЕ ТА ВИДАЧІ «ЧИСТОЇ» ЕНЕРГІЇ З ПІВДНЯ ОЕС УКРАЇНИ

На сьогоднішній день як в Україні так і у всьому Світі будується все більше ВДЕ, в більшості випадків СЕС та ВЕС. У кожної країни різні плани щодо декарбонізації енергетики, але всі вони зводяться до того, що в ближньому майбутньому ВДЕ, в певній мірі, замінять станції на традиційних джерелах енергії. Так, вже сьогодні, деякі розвинені країни світу, мають частку ВДЕ, що складає близько 30-40% від всієї потужності енергосистеми. Однак, впровадження ВДЕ залежить від багатьох чинників, таких як територіальні можливості країни, кліматичні умови, особливості енергосистеми та електричних мереж, інше. Традиційно, багатьом енергосистемам притаманно зосередження великої частки генерації в одному енергорайоні. Останнє призводить до необхідності передавати електроенергію в місця зосередження навантаження. У разі недостатнього мережевого будівництва та наявності «слабких зв'язків» створюються «вузькі місця» в енергосистемах [1-2]. Дана проблема набуває значної актуальності в Україні зі збільшенням частки ВДЕ та потребує розв'язання системним оператором ОЕС України шляхом використання сучасних технологій керування режимами.

З графіків зміни встановленої потужності ВДЕ за період 2015 – 2020 рр. [3] можливо зробити висновок щодо значного збільшення частки ВДЕ в останні роки. На сьогодні продовжується впровадження ВДЕ, потужність деяких еквівалентна енергетичному блоку ТЕС або АЕС. Так, в ближньому десятиріччі частка ВДЕ в ОЕС України може зрости від 30% до 40 %. Значна частина ВДЕ територіально зосереджена на півдні України, а саме в Дніпровській та Південній енергосистемах. На рис. 1 представлено схематичне зображення перетоків потужності в ОЕС України. Стрілками позначено напрямки перетоків потужності між енергосистемами для характерного мінімуму навантажень літнього та зимового режимного днів. Генерація переважно зосереджена на півдні України і передається існуючими мережевими зв'язками до дефіцитних енергорайонів. Варто зауважити, що енергорайон півдня України має особливості та характеризується мережевими обмеженнями.

А саме, при зростанні генерації ВДЕ існує ймовірність обмеження видачі потужності ЗАЕС та ТЕС. Також в енергорайоні недостатньо маневрових потужностей, проте дуже складана розгалужена електрична мережа 750-110 кВ.

Для передачі значної потужності в енергосистемах та вирішення проблеми профіцитних районів та «вузьких місць» розповсюдження отримали гнучкі систем передачі постійного струму (High Voltage Direct Current -

HVDC). Такі системи постійного струму HVDC працюють паралельно сильно завантаженим лініям передачі змінного струму [4,5]. Вже більше 100 таких систем побудовано в різних енергосистемах Світу, проте, в Україні, на сьогоднішній день, такі системи, ще не використовуються.

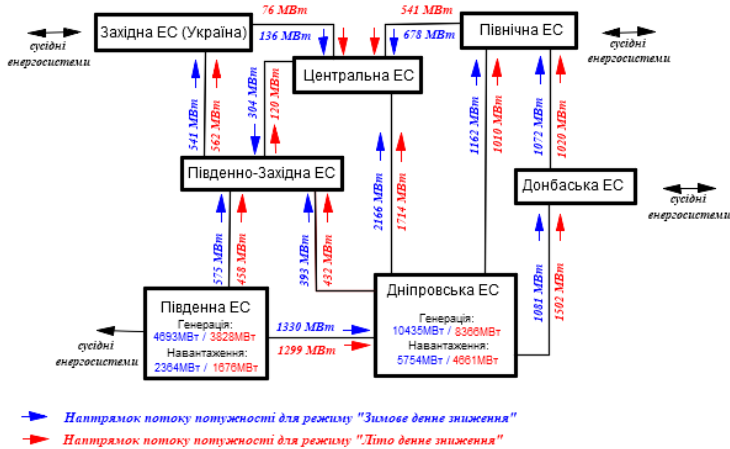


Рис. 1 – Схематичне зображення перетоків потужності в ОЕС України.

Метою даної роботи є аналіз та оцінка можливості інтеграції систем HVDC в ОЕС України паралельно традиційній системі змінного струму для передачі «зеленої» електроенергії з південної частини енергосистеми, де зосереджена значна частина генеруючої потужності у тому числі ВДЕ.

Для аналізу та оцінки інтеграції систем HVDC в ОЕС України проведено математичне моделювання електричних режимів на основі створеної комплексної комп'ютерної моделі. В даному дослідженні з урахуванням часу необхідного для впровадження системи HVDC, модель ОЕС України розроблена для перспективного 2027 року. Перспективна модель включає наступні особливості: враховано поточний стан та перспективне мережеве будівництво [6], враховано існуючі та перспективні ВДЕ, в обсязі 33,9 % від всієї генеруючої потужності ОЕС України для режиму «Зимове денне зниження навантаження» та 42,7% для режиму «Літнє денне зниження навантаження». Гнучка передача постійним струмом представлена за допомогою системи HVDC VSC (Voltage Source Converter) [4,5], що використовує перетворювачі напруги на основі транзисторів. Система HVDC VSC здатна до гнучкого регулюванням активної та реактивної потужності. В моделі досліджень потужність, що передається HVDC VSC прийнята на рівні 1000 МВт. Для порівняння, розглянуто два альтернативних варіанти встановлення такої системи: в першому варіанті потужність передається в напрямку дефіцитного центру ОЕС України: від ПС 750 кВ «Каховська» до ПС 750 кВ «Київська» («HVDC K-K»),

довжина – 600 км. Другий варіант – потужність передається в напрямку південного заходу ОЕС України, де розташована потужна Дністровська ГАЕС, а саме від ПС 750 кВ «Каховська» до ПС 750 кВ «Приморська», довжина – 200 км («HVDC К-П»).

Оцінка впливу інтеграції обох варіантів HVDC проводилася за критерієм забезпечення надійності N-1 шляхом моделювання усталених електричних режимів в ПЗ PowerFactory 2020. Розглянуто більше як 80 аварійних схем на предмет виникнення неприпустимих відхилень напруги та переобтяжень елементів мережі.

За результатами моделювання виявлено, що без впровадження систем HVDC, можливі переобтяжені елементи в мережі (завантаження складають до 146% від номінального значення). При впровадженні в модель системи «HVDC К-П» кількість переобтяжень зменшується (з шести до чотирьох елементів мережі) та величина переобтяжень зменшується до 131%. Водночас, при впровадженні «HVDC К-К» переобтяження (два) залишаються тільки в режимі «Літо денне зниження навантаження» та не перевищують 117%.

Висновок. Інтеграція запропонованих систем HVDC VSC, відповідно до розрахунків, дозволяє збільшити ефективність передачі потужності з профіцитних районів південної частини ОЕС України до центральної та південно-західної її частин. Значно зменшується кількість та величина переобтяжень елементів магістральної мережі, що показує позитивний ефект від впровадження даних систем.

1. M. Migliori, S. Lauria. Renewable sources integration using HVDC in parallel to AC traditional system: the Adriatic project. 2019 AEIT HVDC International Conference (AEIT HVDC). Florence, Italy, 9-10.05.2019. DOI: [10.1109/AEIT-HVDC.2019.8740556](https://doi.org/10.1109/AEIT-HVDC.2019.8740556)
2. Yan Li, Yongning Chi, Zhibing Wang, Haiyan Tang, Guanglei Li, Shuming Sun, Yan Cheng. Study on Fault Control Requirement and Strategy of Large Scale Renewable Energy VSC-HVDC Integration. Conference. 8-10.11.2019. DOI: [10.1109/EI247390.2019.9062065](https://doi.org/10.1109/EI247390.2019.9062065)
3. Встановлена потужність енергосистеми України на 12/2020. URL: <https://ua.energy/vstanovlena-potuzhnist-energosityemy-ukrayiny/> (дата звернення 25.01.2021)
4. В.В. Павловський, А.В. Приходько. Системи передачі електричної енергії постійним струмом. Динамічна модель перетворювача з лінійною комутацією. Праці інституту електродинаміки НАН України. 2020. Вип. 55. С. 16-21.
5. Guo-Jie Li, Lie T.T., Yuan-Zhang Sun, Si-Ye Ruan, Ling Peng, Xiong Li. Applications of VSC-Based HVDC in Power System Stability Enhancement. 2005 International Power Engineering Conference. Singapore, 29.11.-2.12. 2005. DOI: [10.1109/IPEC.2005.206937](https://doi.org/10.1109/IPEC.2005.206937)
6. План розвитку системи передачі на 2021-2030 роки. НЕК Укренерго. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2021/01/Plan-rozvytku-systemy-peredachi-na-2021-2030-roky-shvalenyj-postanovoyu-NKREKP-57-vid-20.01.2021.pdf> (дата звернення 01.02.2021)

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ КЕРОВАНИМИ ПРИСТРОЯМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

В умовах підвищення складності енергосистем та підвищення вимог щодо надійності їх роботи, та збільшення потенційних загроз динамічній стабільності, при модернізації систем передачі надвисокої напруги доцільно звертатися до можливостей застосування сучасних гнучких систем передачі змінного струму (FACTS) [1]. В Україні процес практичного впровадження цих технологій тільки починається та вимагає наукових досліджень, моделювання мереж з їх застосуванням та аналізу доцільності їх інтеграції в конкретні вузли енергосистеми.

Відповідно до стандарту IEC/TR 63097 можливості систем FACTS включають в себе швидке управління напругою, збільшення пропускної здатності по лініях надвисокої напруги, управління потоком потужності в мережевих системах і зменшення коливань потужності.

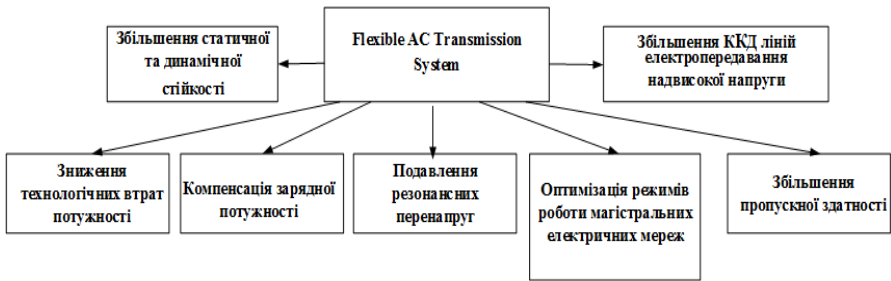


Рис. 1 – Функціональні можливості гнучких систем передачі змінного струму

В умовах лібералізації ринку електричної енергії, швидкого розвитку відновлюваних джерел енергії та змін структури генеруючих потужностей, гостро стоїть питання про забезпечення необхідної пропускної спроможності магістральних мереж передачі та наявності резервів. Одним з способів вирішення цієї проблеми є обґрунтований вибір місця встановлення пристроїв FACTS і підбором їх налаштувальних параметрів, що в свою чергу забезпечує «гнучкість» передавальної системи в цілому.

FACTS можна розділити на дві основні групи за типом включення:

1) Пристрої поперечної компенсації, що включаються паралельно з лінією. До цієї групи зокрема належать керовані шунтнувальні реактори (КШР) та статичні синхронні компенсатори (STATIC synchronous COMPensator – STATCOM).

2) Пристрої поздовжньої компенсації, що включаються послідовно з лінією, такі як тиристорно-керовані поздовжні реактори (thyristor-controlled series reactor – TCSR) та синхронні статичні поздовжні компенсатори (synchronous static series compensator – SSSC).

Капітальні витрати при встановленні FACTS можуть бути швидко компенсовані зменшенням втрат електроенергії, підвищенням надійності роботи ліній та зниженням видатків на їх обслуговування.

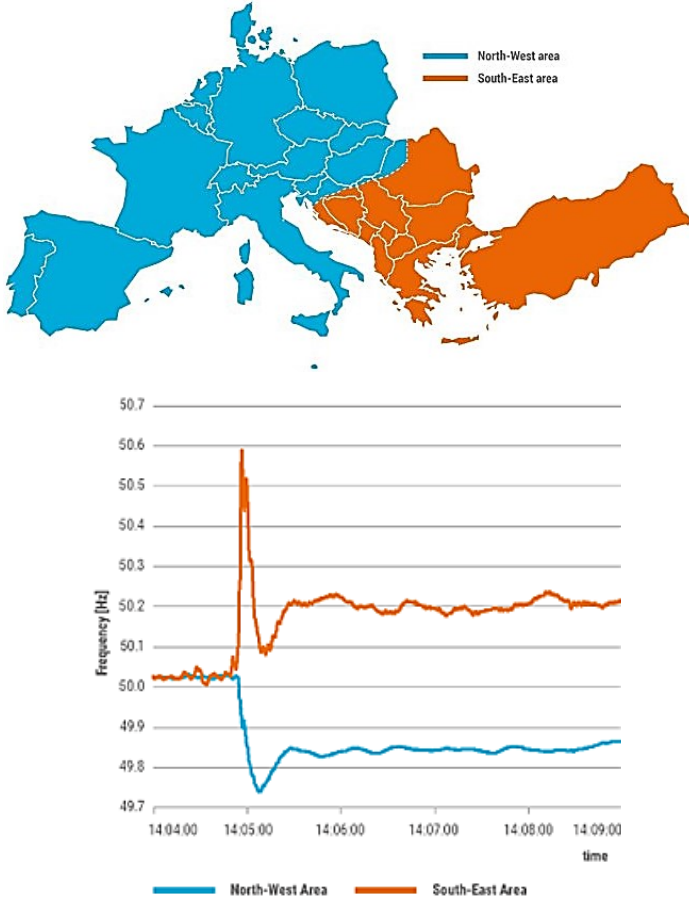


Рис. 2 – Карта континентальної Європи, що показує дві відокремлені зони під час інциденту 8 січня 2021 року та графіки частоти в цих зонах після розсинхронізації

Фахівцями Інституту електродинаміки НАН України було запропоновано практичний підхід та розроблено детальну поетапну методику вибору місця установки керованих шунтувальних реакторів (КШР) та статичних компенсаторів реактивної потужності (СТАТКОМ) в високовольтних мережах, шляхом встановлення кількісного зв'язку між режимними параметрами. Керований шунтуючий реактор є багатофункціональним пристроєм, який при відповідних налаштуваннях дає можливість коригувати як усталені нормальні режими електричних мереж, так і аномальні режими, а також перехідні процеси. Результати, які отримані шляхом проведення моделювання на розроблених спеціалізованих імітаційних моделях показали, що завдяки застосуванню КШР пропускна здатність ліній електропередачі може бути збільшена на 1500-3000 МВт.

У разі застосування КШР відбувається зниження технологічних втрат за рахунок точної компенсації реактивної потужності. Але вирішальне значення з точки зору економії електроенергії має можливість використання КШР для управління поточкорозподілом в неоднорідних мережах енергосистеми для отримання економічного нормального усталеного режиму [2].

Застосування КШР для компенсації реактивної потужності і регулювання напруги також дозволяє вирішувати ще одну актуальну проблему – підвищення ефективності використання неповнофазних режимів магістральних електричних мереж, зокрема при такій найбільш поширеній несправності як однофазне коротке замикання. Це має важливе значення для забезпечення надійності та стійкості роботи енергосистеми.

Вихід з ладу лінії електропередавання надвисокої напруги (ЛЕП НВН) та її відключення є серйозною аварією в системі. В найгіршому випадку це може призвести до розпаду системи на частини з дефіцитом та надлишком генеруючих потужностей, що потребуватиме відключення споживачів у дефіцитних регіонах та зупинки електростанцій у профіцитних. Зокрема така аварія мала місце 8 січня цього року в енергосистемі континентальної Європи ENTSO-E.

Однофазне автоматичне повторне включення (ОАПВ) забезпечує в більшості випадків ліквідацію найбільш розповсюдженого ушкодження ЛЕП НВН – дугового однофазного короткого замикання. Але при наявності в ЛЕП шунтуючих реакторів, індуктивність яких спричиняє ступінь компенсації зарядної потужності наближений до одиниці, під час безструмової паузи ОАПВ утворюється резонансне коло і на відключеній фазі можуть виникнути значні резонансні перенапруги, амплітуда яких обмежується тільки втратами на корону (на практиці до рівня 1,3 – 1,4 від робочої напруги) [3]. Це може призводити до спрацювання захисту від підвищення напруги і, як наслідок, повного трифазного відключення ЛЕП.

На противагу, при успішному ОАПВ коротке замикання фази самоусувається і робочий режим лінії відновлюється. Імовірність успішного гасіння

дуги за заданий час циклу ОАПВ (і, отже, успішного ОАПВ) підвищується при зменшенні струму підживлення дуги. Застосування пристроїв FACTS дозволяє вирішити вищезгадану проблему без використання додаткового силового обладнання (реакторів і комутаторів) для виконання функції компенсації струму підживлення дуги КЗ в паузі ОАПВ. Тому на лініях, на яких встановлені FACTS для компенсації реактивної доцільно їх використовувати в паузі ОАПВ для компенсації струму підживлення дуги короткого замикання і відповідно прискорення її згасання. Усунення резонансних перенапруг і можливість використання ОАПВ на довгих лініях НВН при неповнофазних режимах можуть бути досягнуті за рахунок обмеження впливу струму підживлення дуги КЗ.

Шунтуючі реактори (ШР) для поперечної компенсації ліній застосовуються групами. Група керованих ШР являє собою електромагнітну систему, що має три первинні обмотки, з'єднані в зірку з глухозаземленою нейтраллю, а також з'єднані в зірку вторинні обмотки, до вільних виводів яких підключена трифазна група двонапрямлених тиристорних вентилів. Первинні та вторинні обмотки мають окремі магнітні осердя.

Проблема використання КШР при припиненні ОАПВ полягає в тому, що через велику інерційність магнітних осердь для повного набору або скидання потужності необхідно набагато більш часу, ніж тривалість існування безструмової паузи ОАПВ. В цьому випадку для збільшення пропускної здатності ліній та для гасіння дуги необхідно використовувати STATCOM, який дозволяє швидко контролювати реактивні потоки потужності в лінії [4].

Найбільш ефективним заходом є установка спеціального СТАТКОМ в нейтралі трифазної групи шунтуючих реакторів. Така група пристроїв, утворена так званим чотирипроменевим реактором з STATCOM, призводить до зменшення струму в результаті компенсації міжфазної ємності повітряної лінії, що є основною складовою у створення струму дуги [5].

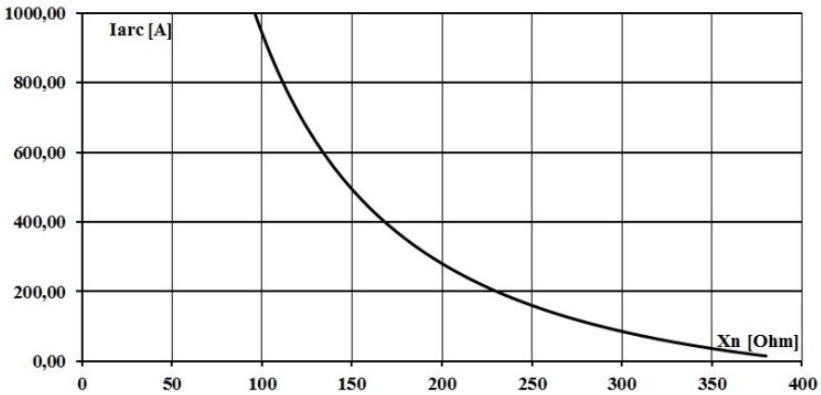


Рис. 3 – Зменшення струму дуги КЗ за рахунок зміни індуктивності СТАТКОМ.

Для залежності часу згасання дуги від амплітуди струму живлення (з ймовірністю 0,9) запропоновано наступну апроксимацію:

$$t_{spar} = 0.2 + 2.86 \cdot 10^{-3} \cdot I_{arc} ,$$

Отримана залежність заснована на аналізі напруг та струмів в розрахунковій схемі передачі потужності, яка включає в себе повітряну ЛЕП напругою 750 кВ та групи шунтуючих реакторів, призначених для компенсації зарядної потужності, що генерується лінією [6].

Компенсації струму також можлива дуги за допомогою синхронних статичних повздовжних компенсаторів (ССПК). ССПК є пристроєм близьким за функціональними можливостями до СТАТКОМ, за винятком того, що він включається в лінію не паралельно, а послідовно. ССПК з'єднується з лінією через послідовно включений трансформатор або силові конвертори (в безтрансформаторних ССПК) та дозволяє плавно управляти потоком потужності, вводячи керовану зміщену напругу в силовий канал. Задяки можливості подавати випереджуючу або відстаючу напругу в квадратурі (+/- 90° по фазі) струмом лінії, змінюючи її ефективний реактивний опір, ССПК також дозволяють керувати поточкорозподілом при нормальних режимах роботи мереж та підвищувати їх пропускну здатність [7].

1. H. Liao and J. V. Milanović (2016) On capability of different FACTS devices to mitigate a range of power quality phenom. IET Generation, Transmission & Distribution 11(5): 1202-1211.
2. V. Kuchansky, D. Malakhata, I. Blinov (2020) Application of Reactive Power Compensation Devices for Increasing Efficiency of Bulk Electrical Power Systems. In: 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems, Kyiv, Ukraine, 2020, pp 83-86.
3. V. Kuchansky (2017) The prevention measure of resonance overvoltages in extra high voltage transmission lines. In: 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kyiv, 2017, pp 436-441.
4. Інтелектуальні енергосистеми: елементи та режими: Під загальною редакцією акад. НАН України О.В. Кириленко / Інститут електродинаміки НАН України. - 2016 - С. 400.
5. V. Kuchansky and I. O. Zaitsev (2020) Corona Discharge Power Losses Measurement Systems in Extra High Voltage Transmissions Lines. In: 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp 48-53.
6. Kuznetsov, Y. Tugay and V. Kuchansky (2017) Influence of corona discharge on the internal overvoltages in highway electrical networks. Technical electrodynamics 2017 (4), pp. 55-60.
7. Voraphonpiput, N. & Bunyagul, Teratam & Chatratana, Somchai. (2008). Power Flow Control with Static Synchronous Series Compensator (SSSC). 9. 117-128.

АСПЕКТИ ВПЛИВУ ЗБІЛЬШЕННЯ ЧАСТКИ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В БАЛАНСІ ОЕС УКРАЇНИ НА ВАРТІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Сьогодні розвиток електроенергетичної галузі відбувається в умовах функціонування нової моделі ринку електричної енергії [1-3] та виконанні Україною взятих на себе гарантовані законодавчо зобов'язань до 2030 року купувати за «зеленим» тарифом всю електричну енергію [4], відпущену станціями з відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ). До основних складових цих зобов'язань відносяться: купівля відпущеної ВДЕ електроенергії за фіксованим «зеленим» тарифом; купівля електроенергії єдиним державним підприємством; своєчасні розрахунки за викуплену електроенергію. Таким чином у нову ринкову модель закладено функції принципово нового учасника ринку електроенергії – Гарантованого покупця (ГП). Цей учасник ринку має купувати за «зеленим» тарифом всю електроенергію з ВДЕ у повному обсязі та реалізовувати механізми компенсації такого тарифу.

З огляду на це, а також на стрімке зростання частки ВДЕ в загальному балансі ОЕС України актуальною задачею, що сьогодні потребує розв'язання, є оцінка впливу ВДЕ на ринкову вартість електроенергії в Україні з урахуванням вимог чинного законодавства, технологічних обмежень функціонування ВДЕ та процесів на ринку електроенергії. До основних технологічними проблемами інтеграції станцій з ВДЕ до ОЕС України слід відносити: нерегульований характер відпуску електроенергії станціями з ВДЕ; невідповідність між добовим графіком відпуску електроенергії станціями з ВДЕ та добовим графіком електроспоживання; неточність прогнозу обсягів відпуску електроенергії станціями з ВДЕ [5, 6].

За результатами досліджень впливу станцій з ВДЕ на процеси ціноутворення в окремих ринкових сегментах виділені наступні основні фактори комплексного впливу цих станцій на вартість електроенергії для кінцевих споживачів: прогнозні значення обсягів відпуску електроенергії станціями з ВДЕ впливають на вартість електроенергії в сегменті ринку «на добу наперед» (РДН) та початкову вартість послуг балансування в сегменті балансуючого ринку (БР) [7]; точність прогнозу обсягів відпуску електроенергії станціями з ВДЕ впливає на обсяги та вартість небалансів, а також на обсяги та вартість допоміжних послуг, що неявним чином впливає на функцію пропозиції електроенергії на ринку допоміжних послуг (РДН) та функції пропозиції послуг балансування в сегменті БР.

В сегментах ринку допоміжних послуг (РДП) [8, 9], РДН та БР процеси ціноутворення реалізуються механізмами двостороннього (для РДН) та односторонніх (для РДП і БР) аукціонів з визначенням граничної ціни. Пропози-

ція електроенергії від станцій з ВДЕ подається на погодинні торги РДН у формі пропозиції з продажу електроенергії за заниженою ціною, що гарантує першочергове її прийняття. Тому, як показано на рис.1, подана на погодинні торги РДН пропозиція електроенергії від станцій з ВДЕ зміщує агреговану функцію пропозиції в сторону витіснення найдорожчих продавців електроенергії поза зону ринкової рівноваги.

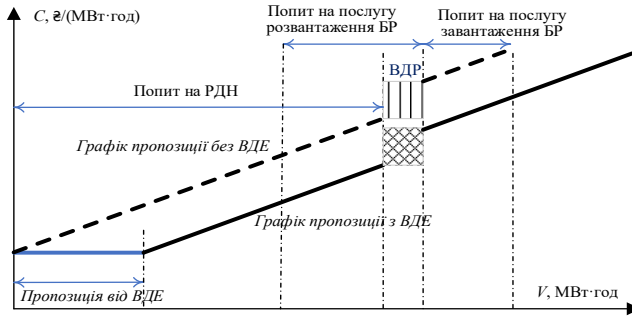


Рис.1 – Вплив пропозиції виробників з ВДЕ на ціни в сегментах ринку електричної енергії України

Таким чином, збільшення частки ВДЕ в балансі ОЕС України наразі стимулює зменшення граничних цін на РДН, що, у свою чергу, призводить до зниження цін у сегментах внутрішньодобового ринку (ВДР) та БР. Дійсно, витіснена обсягами ВДЕ з області пропозиція електроенергії від інших виробників доступна для торгів у сегментах ВДР та БР за ціною нижчою, ніж пропозиція, доступна для торгів у цих сегментах за відсутності обсягів ВДЕ.

Збільшення частки ВДЕ у структурі ОЕС України, з огляду на нерегульований різкозмінний характер відпуску ними електроенергії, вимагає збільшення резервів виробничих потужностей під потреби забезпечення сталої та надійної роботи ОЕС України як в частині зарезервованих обсягів допоміжних послуг на РДП, так і в частині обсягів послуг балансування у сегменті БР. Витрати на закупівлю та використання таких послуг компенсуються відповідною статтею у тарифі на диспетчеризацію Оператора системи передачі (ОСП). Збільшення обсягів резервування виробничих потужностей електростанцій на потреби регулювання режиму ОЕС України призводить до появи ряду чинників, які призводять до збільшення вартості електроенергії у кінцевого споживача, зокрема і за рахунок скорочення обсягів пропозиції електроенергії у сегменті РДН. Незважаючи на невелику долю обсягів резервів допоміжних послуг на фоні обсягів виробництва/споживання електроенергії в ОЕС України, існуючий характер факторів впливу може призводити до помітного збільшення вартості електроенергії для споживача.

На ринку електроенергії України БР функціонує як сегмент, організований ОСП з метою купівлі послуг балансування режимів ОЕС України. На

відміну від інших ринкових сегментів, де торги здійснюються в термінах прогнозованих попиту і пропозиції, на БР реалізується балансування фізичних процесів виробництва та споживання електроенергії. В залежності від характеру прогнозованого небалансу, ОСП купує послуги балансування у виробників електроенергії. Вартість куплених у сегменті БР послуг балансування режиму ОЕС України у подальшому розподіляється між іншими учасниками ринку електроенергії України пропорційно обсягам допущених ними небалансів. Утворювані станціями з ВДЕ небаланси впливають на збільшення обсягів та вартості небалансів у сегменті БР. Тому в задачах дослідження впливу станцій з ВДЕ на вартість електроенергії сегмент БР розглядається в частині впливу балансувальної групи ГП на обсяги і вартість небалансів, а також в часині оцінки витрат, пов'язаних із неточним прогнозом обсягів відпуску електроенергії станціями з ВДЕ. Наведене вище обумовлює потребу розробки засобів моделювання процесів ціноутворення в сегментах ринку «на добу наперед» та балансувального ринку для ефективного рішення задачі отримання чисельних індикаторів комплексного впливу обсягів відпуску електроенергії станціями з ВДЕ на вартість електроенергії у споживача.

1. Про ринок електричної енергії. Верховна Рада України; Закон від 13.04.2017 № 2019-VIII. <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>.
2. Кириленко О.В., Басок Б.І., Базєєв Є.Т., Блінов І.В. Енергетика України та реалії глобального потепління// Технічна електродинаміка. 2020. № 3. С 52-61.
3. Ivanov H., Blinov I., Parus Y. Simulation Model of New Electricity Market in Ukraine // IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems. 2019.
4. Про альтернативні джерела енергії. Верховна Рада України; Закон № 555-15. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15>.
5. Блінов І.В., Мірошник В.О., Шиманюк П.В. Короткостроковий інтервальний прогноз сумарного відпуску електроенергії виробниками з відновлювальних джерел енергії. Праці Інституту електродинаміки НАН України 2019. Вип. 54: С. 5-12.
6. Іванов Г.А., Блінов І.В., Парус Є.В., Мірошник В.О., Складові моделі для аналізу впливу відновлюваних джерел енергії на ринкову вартість електроенергії в Україні// Технічна електродинаміка. 2020. № 4. с. 72-75
7. Блінов І.В., Парус Є.В., Іванов Г.А. Імітаційне моделювання функціонування балансувального ринку електроенергії з урахування системних обмежень на параметри ОЕС України // Технічна електродинаміка. 2017. № 6. С. 72 – 79.
8. Blinov I., Parus E. Approach of reactive power pricing for ancillary service of voltage control in Ukraine// IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems. 2014. Pp. 145-148.
9. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В. Оцінка роботи електростанцій при наданні допоміжних послуг з первинного та вторинного регулювання частоти в ОЕС України. Технічна електродинаміка. 2013. № 5. С. 55 – 60.

ВИЗНАЧЕННЯ НАЙЕФЕКТИВНІШОЇ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ВОДИ

Актуальність проблеми очищення та знезараження води. Вода – невід’ємна складова життя людини. Запаси чистої води на землі продовжують неспинно зменшуватись, тому існує потреба в регенерації забрудненої складової водного середовища. Промислові та побутові стоки представляють серйозну загрозу екосистемі через викиди їх у водойми [1]. В ньому існує широкий спектр органічних сполук, які негативно впливають на здоров’я людей, а також на екосистему в цілому. Тому, задача максимального зниження негативного впливу цих забруднювачів має бути однією з найбільш пріоритетних для всіх країн.

Існуючі методи обробки води. Щоб запобігти забрудненню існують очисні споруди. Це загальна назва для декількох етапів обробки від різноманітних забруднювачів. Перш ніж перейти до опису етапів очищення слід зауважити, що рівень забруднення водоймищ є різним на рівні з тим, що існують різні типи забруднювачів, а саме: дрібне сміття, органічні забруднювачі та мікрозабруднювачі (МЗ).

Зазвичай, в очисних спорудах існує три етапи обробки [2]:

1. Первинна обробка. Суть і головна її задача полягає в тому, щоб, за допомогою фільтрів, видалити велике тверде сміття. У відстійнику також відділяється масло та жир.

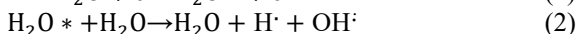
2. Вторинна обробка. Вона полягає в біологічному перетворенні розчинних і колоїдних органічних сполук за допомогою мікроорганізмів. Саме через це, під час первинної обробки, є сенс розкласти якомога більше біорозкладаючого матеріалу, щоб знизити потребу в подальшій очистці. Суміш мікроорганізмів з неорганічними і органічними частинками, що містяться в твердих речовинах, називається активним мулом.

3. Третинна обробка. Цей етап є завершальним і складається з будь-яких додаткових способів обробки, в залежності від необхідного кінцевого результату. Найпоширенішим є хлорування через його низьку вартість і досить високу ступінь обробки. Однак цей процес може викликати утворення шкідливих органічних сполук з вмістом хлору [2].

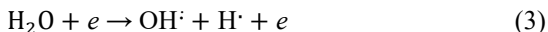
Процес біоочистки і хлорування мають дещо спільне але відрізняються в ефективності видалення забруднювачів. Але, як показали багато досліджень у світі, до теперішнього часу звичайні очисні споруди не могли в достатній мірі видалити саме мікрозабруднювачі (МЗ) [2]. Мікрозабруднювачі – речовини, що надходять у довкілля з природних та антропогенних джерел і знаходяться у дуже малих концентраціях (мкг/л і навіть нг/л) [2], але вони суттєво впливають на оточуюче середовище та здоров’я людини.

Як наслідок, можна стверджувати, що комплекс очисних споруд мусить включати технологію, яка буде ефективно боротися з МЗ. Протягом останніх десятиріч активно досліджуються технології, в процесі роботи яких генеруються високоактивні частинки (радикали OH , O , молекули H_2O_2 , O_3), та ультрафіолетове випромінювання. Згадані технології отримали назву АОТ's (advanced oxidation technologies / передові окисні технології) – це технології, в яких генерація сильних окислювачів та УФ-випромінювання відбувається в безпосередній близькості з водою, що обробляється. Прикладами АОТ's є перексидування (застосування перексиду водню H_2O_2), УФ-опромінювання, радіоліз, мікрохвильова обробка, обробка ультразвуком, електрохімічне окислення електророзрядні технології, тощо. Серед усіх технологій найбільш конкурентноздатними з точки зору економічної рентабельності при промисловому використанні є озонування та електророзрядна обробка. Одні з найбільших окисних потенціалів ϕ мають озон $\phi(\text{O}_3) = 2,1 \text{ В}$ та гідроксильний радикал $\phi(\text{OH}) = 2,7 \text{ В}$. Особливу цінність для боротьби з МЗ відіграє радикал OH . Він утворюється внаслідок коливально – обертального збудження молекул води, її дисоціації та іонізації [3]:

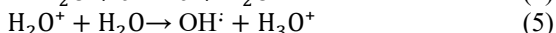
Коливально-обертальне збудження:



Дисоціація:



Іонізація:



Коли кисень піддається впливу електричного розряду, атом O $\phi(\text{O}) = 2,42 \text{ В}$ може генеруватися внаслідок дисоціації молекули O_2 і підвищує швидкість виробництва OH [4].



Крім того, атом кисню може безпосередньо реагувати з забруднюючими речовинами і також бере участь у реакціях з O_2 , що призводить до утворення O_3 .

Слід приділити особливу увагу електророзрядним технологіям. Для цього є важливі причини. По-перше, дана технологія є відносно простою. Вона активно вивчається та постійно вдосконалюється. По-друге, обробка плазмою є екологічно чистим процесом, що виключає необхідність застосування хімічних реагентів. По-третє, вона показує позитивний результат з руйнування хімічної структури стійких органічних сполук, включаючи ті, до складу яких входять такі стійкі циклічні утворення, як бензолні кільця [5].

Метою роботи є аналіз електророзрядних технологій обробки води на основі порівняння їхньої енергоефективності, а також визначення найефективнішого їх виду.

Критерії порівняння електророзрядних технологій обробки води. На сьогоднішній день серед наукової літератури по даному профілю є відносно невелика кількість порівняльних оглядів електророзрядних технологій. Одним з перших, хто це зробив, був Malik [6]. В його роботі були розглянуті електророзрядні процеси, під дією яких відбувалося розкладання органічних барвників у воді. Locke і Jiang [7,4] порівнювали електророзрядні технології, за допомогою яких, в переважній більшості, відбувалося розкладання фенольних сполук. Vanraes [2] сфокусував увагу на порівнянні конструктивних особливостей та специфіку конструкцій електророзрядних реакторів, які впливають на процеси обробки води.

Жодна з цих робіт не дає чіткого твердження на предмет того, яка технологія є найбільш прийнятлива з точки зору промислового використання оскільки порівняння велось для робіт, виконаних при суттєво відмінних умовах. Перш ніж перейти до порівняльного аналізу і спробувати аргументовано сказати який вид електророзрядних технологій є прийнятнішим по ряду критеріїв, необхідно окреслити ці критерії. Для модельних розчинів в літературі існує відносно універсальний показник ефективності – енергетичний вихід Y [4] (відношення кількості розкладеної при розряді речовини до кількості вкладеної в цей розряд енергії). Як правило, експерименти на предмет енергоефективності проводяться на модельних розчинах, в яких є один вид забруднювача, а саме барвник [3,4,6]. Це пояснюється простою та зрозумілою методикою визначення ступені розкладання забруднювача (знебарвлення). При використанні електророзрядної технології слід враховувати вплив проміжних з'єднань, які утворюються внаслідок дії високоактивних частинок на молекули барвника. Ще однією причиною використання барвників є те, що проміжні з'єднання від них значно менше впливають на процес обробки ніж проміжні з'єднання від розчинів з широким спектром всіляких хімічних сполук.

Для стічної води, яка містить широкий спектр сполук, важливим показником є хімічне споживання кисню (ХСК). Цей показник свідчить про кількість кисню, що потрібно для окислення речовин, які містяться в літрі води [мг/л]. Допустима величина ХСК варується від того, для чого буде використана вода (питна вода, стічна, побутового використання). Спосіб визначення ХСК є достатньо складним і може бути виконаний тільки в лабораторіях зі спеціальним устаткуванням.

Наступним показником є біохімічне споживання кисню (БСК). Це кількість кисню використаного на аеробне біохімічне окислення під дією мікроорганізмів і розкладі нестійких органічних сполук, які знаходяться у воді.

Ще одним показником для оцінки якості стічних вод є вміст органічного вуглецю (ТОС). Цей термін використовується для позначення виміру органічних забруднювачів на основі вуглецю в системі водопостачання.

Кількість показників якості як стічної так і питної води оцінюється десятками. Тому, в подальшому, як основний критерій порівняння, буде використано лише Y .

Необхідно дати певне уточнення стосовно Y . На енергетичний вихід впливає цілий ряд факторів. Слід навести найбільш суттєві з них:

- середовище запалювання і роботи розряду (в об'ємі води або в газі);
- розвинутість поверхні води. Для більш ефективної обробки потрібно мати якомога більш розвинуту поверхню розчину в зоні обробки. Вище згаданий радикал OH має вельми короткий час життя (порядку мікросекунд). Враховуючи це, товщина проникнення його в воду обмежується цим часом.

- Вид розряду та прикладеної напруги (розряд постійного струму, розряд змінного струму, імпульсний розряд);

- частота повторення розрядних імпульсів. Цей фактор є досить неоднозначним. Логічно припустити, що, чим більша частота повторення імпульсів вкладеної енергії – тим ефективніша обробка води. Однак з літератури відомо, що оптимальна частота повторення імпульсів лежить в межах $f \approx 100\text{-}500$ Гц [9,10,11]. Відповідь на питання: «чому саме так?», - в літературі не знайдена і дослідники не дають аргументованого твердження стосовно цього. Прийнятлива частота визначається експериментальним шляхом. Очевидно, що вибір саме такого діапазону спричинений надзвичайно складним перебігом хімічних реакцій під час дії плазми розряду на воду;

- концентрація та вид забруднювача;
- витрати повітря. По-перше, для ефективної роботи розряду необхідно забезпечити підтримання рівня кисню в зоні розряду. Основним є знаходження оптимального рівня витрат. Від цього залежить кількість згенерованого озону, який має великий окисний потенціал;

- водневий показник (рН). Вміст іонів водню (гідроокисній– H^+) у природних водах визначається в основному кількісним співвідношенням концентрацій вугільної кислоти і її іонів. Як правило, використовують початкові модельні розчини з рН в межах 5-8 [6].

- наявність в початковому розчині добавок або каталізаторів (перекис водню, озон, сульфат заліза, оксид титану, активоване вугілля і т.д.) [4];

- тиск повітря в зоні обробки. Переважно всі технології по обробці води проходять при атмосферному тиску. Це пояснюється тим, що відсутня необхідність додаткового створення підвищеного або пониженого тиску, що накладає додаткові затрати та труднощі конструювання промислової установки. Також підвищений тиск характеризується більшою напругою, яку потрібно подати, щоб утворити розряд.

Порівняння за критерієм енергоефективності (Y). Міркування, приведені в попередньому пункті роботи, підтверджуються даними з вищезгаданих оглядових робіт, де представлено енергетичні виходи для технологій [2,3,4], а також додана певна кількість нещодавніх експериментальних даних.

Варто зазначити, що електророзрядні технології згруповано на основі схожій ступені розкладення забруднювача, а саме 40-60 % задля коректного порівняння. В оглядах забруднювач при проведенні експериментів застосовувався різний на рівні з тим, як і його концентрація в розчині, а отже це може бути причиною різного результуючого Y при відносно однакових експериментальних умовах, Тому слід враховувати цей фактор.

Що стосується домішки, то для більш коректного порівняння було взято за основу однакову її початкову концентрацію ($C = 50$ мг/л) при всіх технологіях. Для цього була перерахована величина Y, коли реальна концентрація (використана в конкретній роботі) відмінна від 50 мг/л. Основою для перерахунку було рівняння хімічної кінетики:

$$dC/dt = -k_p C C_0, \quad (7)$$

де C – концентрація домішки; k_p -константа швидкості реакції, яка залежить від виду домішки та окисного потенціалу окиснювачів (ОН, O_3 , H_2O_2 , ...); t – час; C_0 – концентрація окиснювача.

Як видно з рівняння (1), швидкість зменшення концентрації домішки лінійно залежить від її початкової концентрації і є одним з елементів в розрахунку енергетичного виходу Y:

$$Y = \Delta C / \Delta W, \quad (8)$$

де ΔC – зменшення концентрації домішки; ΔW – затрачена на це енергія.

На основі рівнянь (7), (8) був проведений перерахунок енергетичних виходів. Іншими словами, оціночно можна сказати в скільки разів реальна використана в експериментах концентрація домішки відрізняється від умовної ($C^* = 50$ мг/л) в стільки разів Y будуть вищі (чи нижчі) представлених в оглядах.

На основі аналізу даних можна зробити ряд стверджень. По-перше, обробку води доцільно вести в газовому середовищі на кордоні розділу фаз «газ-рідина». Це, наприклад, доводить порівняння ІКР над водою з ІКР в воді. При однаковому ступені розкладання і однаковій початковій концентрації забруднювача, в першому випадку Y в 60 разів вищий. Воду в зону обробки доцільно подавати у вигляді крапель бо це збільшує площу контакту розряду з водою. Це підтверджує порівняння ІБР на розпилену воду і ІБР на плівку води (Y в першому випадку в 2 рази вищий). Барботування повітря при ІКР у воді, а як наслідок збільшення площі контакту окиснювачів з водою і збільшення кількості окиснювачів, неістотно підвищує енергоефективність в цілому. На основі цього можна сказати, що ефективність обробки

відносно середовища дії плазми розташовується в такому порядку (від найбільш- до найменш ефективної): розряди на воду в краплинному стані → розряди на поверхню води → розряди у воді.

Тліючі розряди є малоефективні. Їхні енергетичні виходи не перевищують 1 г/кВт·год. Це пояснюється тим, що процес обробки, переважним чином відбувається внаслідок УФ-опромінення. Те саме, стосовно ефективності, можна сказати про радіочастотний, мікрохвильовий та діафрагмовий розряди. Вони не є конкурентно-спроможними при промислового використанні.

Також, можна стверджувати, що найефективнішими розрядами є КР та БР. При чому, використання імпульсної напруги підвищує енергоефективність в сотні разів (в залежності від виду розряду).

Для більш конкретного порівняння БР та КР, їх енергоефективність представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Енергоефективність електророзрядних технологій

Вид розряду	Середовище розряду	C, мг/л	Забруднювач	Ступінь розкладання, η, %	Y, г/кВт·год	Джерело
1. ІКР	На поверхню води	10	МС	90	4,6	[12]
		40	МО	93	0,7	[12]
2. ІБР	На поверхню води	10	МС	94	4,8	[13]
		50	МС	78	35	[13]
		40	МО	98	20	[13]

В даній таблиці зібрані енергетичні виходи з використанням ІКР та ІБР при початкових концентраціях 10, 40, 50 мг/л та домішками у вигляді метилоранжу (МО) та метиленової синьої (МС). Як видно з неї, при обробці розчину з концентрацією метиленової синьої 10 мг/л енергоефективність ІКР та ІБР практично однакова, 4,6 та 4,8 г/кВт·год відповідно при близькому ступеню розкладання 90 % (ІКР) та 94% (ІБР). Якщо ж порівняти експериментальні дані з C = 40 мг/л, то при розкладанні 98 % метилоранжу ІБР енергетичний вихід в 28 разів вищий, ніж при розкладанні 93 % метилоранжу ІКР. На підставі цього можна стверджувати, що ІБР є значно ефективнішим ніж ІКР для боротьби з МЗ. Такий результат пояснюється головним чином відмінністю в фізичному характері розряду. ІБР характеризується суттєво просторово одноріднішим електричним полем (набагато вища кількість струмопровідних каналів на 1 см² розрядного проміжку, а як наслідок більше згенерованих окисних частинок). По-друге, при ІБР набагато вища середня напруженість електричного поля в міжелектродному проміжку. Тобто окислювачі генеруються не в окремій зоні, як у випадку ІКР (біля коронуючого електроду), а у всьому проміжку. Ця сукупність факторів в цілому дає перевагу ІБР на поверхню води над усіма іншими розрядами.

Висновки. Виконано порівняльний аналіз енергоефективності обробки води на основі електророзрядних технологій. Основним критерієм порівняння технологій був енергетичний вихід розряду. На цю величину впливає ряд факторів: розвиненість поверхні, середовище запалювання, вид прикладеної напруги, концентрація та вид забруднювача. На підставі проведеного аналізу встановлено, що найефективнішою серед електророзрядних технологій є технологія на основі імпульсного бар'єрного розряду в газі на розвинуту поверхню води у вигляді краплин.

1. Димакова Н.А., Шарапов Р.В. Проблема загрязнения подземных вод, *Современные наукоемкие технологии*, № 2. С. 79-82, 2013.
2. Patrick Vanraes, Anton Y. Nikiforov and Christophe Leys. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. 2016. Chapter 15. Pp. 429–478.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/61830>.
3. W.F.L.M. Hoeben, E.M. van Veldhuizen, W.R. Rutgers, C.A.M.G. Cramers, G.M.W. Kroesen, The degradation of aqueous phenol solutions by pulsed positive corona discharges, *Plasma Sour. Sci. Technol.* 9 (2000) 361–369.
4. B. Jiang, J. Zheng, S. Qiu, M. Wu, Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation, *Chem. Eng. J.* 236 (2014) 348–368.
5. Божко І.В., Кондратенко І.П., Ефективність обробки водного розчину метиленою сині імпульсним бар'єрним розрядом на його поверхню, *Технічна електродинаміка*, №6, С. 89-97, 2018.
6. M. A. Malik, Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient?, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 30, pp. 21–31, 2010.
7. B.R. Locke, M. Sato, P. Sunka, M.R. Hoffmann, J.S. Chang, Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment, *Ind. Eng. Chem. Res.* 45 (2005) 882–905.
8. Кондратенко І.П., Божко І.В., Берека В.О., Визначення параметрів краплинно-плівкового стану модельної рідини, *Інтернет-конференція Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування*. Київ, Україна, 20-24 травня 2019.
9. T. Sugai, W. Liu, A. Tokuchi, W. Jiang, and Y. Minamitani, “Influence of a circuit parameter for plasma water treatment by an inductive energy storage circuit using semiconductor opening switch”, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 41, No. 4, pp. 967–974, 2013.
10. T. Sugai, A. Tokuchi, W. Jiang, and Y. Minamitani, “Investigation for optimization of an inductive energy storage circuit for electrical discharge water treatment”, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 42, No. 10, pp. 3101–3108, 2014.
11. T. Sugai, W. Jiang, A. Tokuchi, “ Influence of Forward Pumping Current on Current Interruption by Semiconductor Opening Switch ”, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 22, No. 4, pp. 1971–1975, 2015.
12. Grabowski L.R., Veldhuizen E.M., Pemen A.J.M., Rutgers W.R. Breakdown of methylene blue and methyl orange by pulsed corona discharge, *Plasma Sources Sci. Technol.*, №16, Pp. 226–232, 2007.

ЗАСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОСЕРДЯ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ

Історія становлення та розвитку методів контролю та діагностування технічного стану осердя статора турбогенератора (ТГ) нерозривно пов'язана з розвитком потужних генераторів. Основним вузлом статора потужного ТГ є його осердя, втрата працездатності якого означає необхідність заміни всього статора, на відміну від більшості інших складових частин ТГ. [1,2] При цьому працездатність осердя визначається в основному станом пружного стиснення електротехнічної сталі, який йому наданий при виробництві. [3,4]

Розвиток галузі та зростання потужності ТГ, призвели до розробки ряду методів тестування осердя статора ТГ з метою виявлення ушкоджень та зменшенню витрат на відновлення його працездатності. Незважаючи на те, що сучасна структура багатопарового осердя статора набула поширення ще в 1910 р., перші методики тестування почали реалізовувати починаючи з 1952 р. [5,6], що обумовлено початком використання водневого охолодження в генераторах у зв'язку з необхідністю подальшого зростання максимальної потужності ТГ.

Перші методики пошуку пошкоджень та дефектів осердя статора описані у роботі [7] та полягають у виявленні зон надмірного зростання температури (гарячих точок), що виникають під дією підведеної потужності, яка відповідає 100 % потужності ТГ у номінальному режимі роботи. Пошук точок з підвищеною температурою найпростіше виконувати на дотик, проте з розвитком засобів пірометричних вимірювань, стало доцільно використовувати їх для температурної індикації (просочені хлоридом кобальту листи паперу або шматки парафіну). Після виділення проблемних точок, для подальших дослідження температурних показників використовували термопари.

Подальший розвиток технології пірометричних вимірювань [8], дозволив використовуючи інфрачервоні (ІЧ) телевізійні камери та встановити допустимий поріг виявлення дефектів за мінімальної різниці температур в 10 °С («гарячих точок»). За рішенням Центральної ради з виробництва електроенергії (СЕГВ) приведений поріг нерівномірності температури поверхні вважається гранично допустимим для виключення глибокозалагаючих дефектів. Цей метод отримав назву High Flux stator core Test (HFT).

Згідно першого стандарту, що описує метод HFT IEEE Std 56-1977 [9], після 10-20 хвилин індукування осердя магнітним потоком потужністю 100 % від номінальної, виділені гарячі точки підлягають ремонту для продовження експлуатації ТГ. В результаті практичного використання методу, було встановлено, що доцільно проводити тестування на рівні потужності близькій до 100% від номінальної. На сьогоднішній день, в діючому стандарті IEEE

Std 62.2-2004 [10] детально прописано методику тестування НФТ з обмеженням нерівномірності температур гарячих точок в $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, при роботі генератору «на рівні або близько до» номінальної щільності потоку протягом 2 годин. Окрім зазначеного вище стандарту, існують інші загальнодоступні стандарти, зокрема можна виділити державний стандарт України, СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 [11], який вимагає випробувань при напруженості потоку магнітного поля 1,0 або 1,4 Тл протягом 90 або 45 хвилин відповідно та з критеріями підвищення температури $<15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Багато виробників обладнання мають свої власні стандарти тестування, проте вони є конфіденційними.

Згідно діючих стандартів, методика НФТ вимагає намотування достатньої кількості витків кабелю навколо осердя для створення індукції на рівні 80-100 % від номінального потоку. На рисунку 1 приведений приклад [12] розташування тестової обмотки для ТГ та гідрогенератора. Контроль рівня підведеної потужності забезпечується додатковим витком обмотки встановленим навколо осердя.



Рис 1 – Обмотки НФТ (а) ТГ, (б) гідрогенератора

Типові результати оцінювання за методикою НФТ, що приведені на рисунку 2, ілюструють (а) наявність одиночного виявленого дефекту та (б) наявність розподілених серйозних пошкоджень осердя статора.

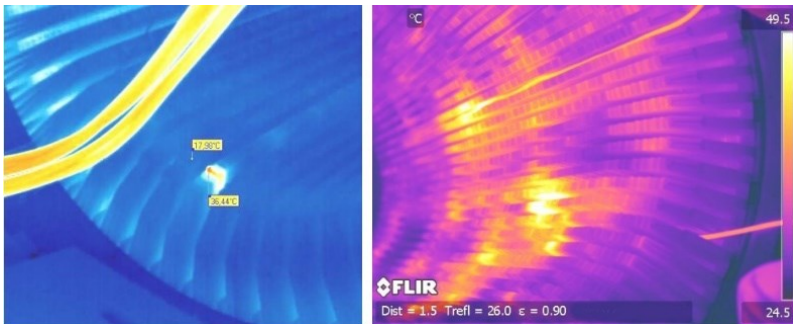


Рис 2 – НФТ ІЧ-зображення: (а) точкове пошкодження осердя, (б) розподілені пошкодження осердя

Окрім методів тестування, які проводяться при регламентних роботах з технічного обслуговування та ремонту, активно розвиваються діагностичні методи та засоби моніторингу стану осердя ТГ. Так звані «онлайн» методи мають на меті можливість виявлення пошкодження на початковому етапі, що зазвичай дозволяє уникнути більш серйозних пошкоджень та їх наслідків. На даний момент не відомо жодної методики, здатної виявити дефекти осердя на етапі зародження, проте найближчі до реалізації цієї мети є такі методи, як моніторинг стану генератору (GCM) та метод виявлення напруги на валу. Останній, на сьогоднішній день є недостатньо чутливий до різного типу дефектів в осерді статора, що спричиняють магнітну асиметрію в осерді. Поява магнітної асиметрії в поєднанні з обертовим полем створює змінну напругу вздовж ротора генератора, що є інформативним параметром методу.

Показники методу моніторингу GCM, що підтримується стандартом IEEE Std 1129-2014 [13], отримують шляхом зондування аерозолів або частинок в охолоджуючому газі статора з водневим охолодженням. Зондування відбувається шляхом пропускання газу теплоносія через радіоактивну іонізаційну камеру, де контролюється струм через нормально чистий іонізований потік H_2 . Коли присутні (особливо органічні) аерозолі або тверді частинки, вони приєднуються до іонів, збільшуючи їх масу та зменшуючи їх рухливість, а отже, зменшуючи струм. Зменшення струму понад 50% зазвичай вважається індикатором тривоги. Приведений метод дозволяє виявити перегрів ізоляційного покриття в осерді статора або виявити початок горіння в ТГ з повітряним охолодженням. Проте даний метод не дозволяє локалізувати джерело перегріву або горіння, що ускладнює інтерпретування тривоги. Частковим вирішенням проблеми розрізнення джерела перегріву стало використання хімічних покриттів, що є чутливі до підвищення температури, хімічний склад яких є досить унікальним. Маркери наносяться на різні зони ТГ та виявляються при зондуванні через хімічний аналіз. Проте 24-годинний цикл хімічного аналізу не дозволяє оперативно визначити причину аварії, що може призвести до тяжких наслідків при несвоєчасному вимкненні ТГ.

Проведений аналіз методів та засобів визначення технічного стану осердя статора ТГ показав, що найбільш перспективним є напрямок онлайн моніторингу стану ТГ. Засоби «онлайн» моніторингу дозволяють попередити або мінімізувати наслідки значних поломок та дефектів осердя статора ТГ. Отже, велике значення має надійність методів контролю та діагностування фактичного стану пресування осердя статора. Відсутність будь-яких ефективних методів призводить до залежності визначення фактичного ступеня спресованості заліза осердя статора від своєчасного проведення оглядів. Слід також зазначити, що ефективність застосування методів залежить від можливості уникати як хибнопозитивних результатів, що призводять до непотрібних фінансових витрат і часових затримок, так і помилково негативних результатів, коли небезпечні дефекти, що розвиваються можуть залишитися непоміченими та призвести до серйозних фінансових, а в деяких випадках і екологічних наслідків. Таким чином, періодичне діагностування знижує ймовірність

аварії, але не гарантує виявлення дефектів, що можуть виникати в міжремонтний період. Останнє викликає необхідність в розробці методів та засобів прямого виявлення дефектів, які з'являються під час роботи машини на початковій стадії їх появи і розвитку, а також своєчасне прийняття правильних рішень з їх ліквідації до виникнення аварійної ситуації, що дозволить забезпечити високий коефіцієнт готовності, скорочення часу простою, зниження витрат на ремонті ТГ.

1. Зайцев С.О., Панчик М.В. Фізичні процеси та їх вплив на розвиток дефектів в осердді статора потужних генераторів. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2020. Issue: 224. P. 81–84.(Index in Copernicus, Google Scholar) DOI:10.31174/SEND-NT2020-224VIII27-20.
2. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Capacitive distance sensor with coplanar electrodes for large turbogenerator core clamping system. *Proceedings of the 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, April 16 – 18, 2019, Kiev, Ukraine. P.644-647.
3. Левицкий А.С., Зайцев Е.А., Панчик М.В. Контроль сердечника статора турбогенератора при сборке. «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов»: Сборник тезисов 7-й международной научно-технической конференции, 24-25 сентября 2020 года, г. Могилев, Республика Беларусь. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. С. 99-105. URI: <http://e.biblio.bru.by/handle/1212121212/12991>
4. Левицкий А.С., Зайцев Е.А., Кобзарь К.А. Измерение хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах сердечника статора турбогенератора с помощью емкостного сенсора//Приборы и методы измерений. – 2018 – Т.9(2) –С. 121-129. DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129.
5. H. R. Tomlinson, «Interlaminar insulation test for synchronous machine stators», *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 71, issue: 1, January 1952, pp. 676-677.
6. J. P. Harbord, «Some tests on modern high-speed turbo alternators», *IEE Students' Quarterly Journal*, vol. 24, issue: 93, September 1953, pp. 3-9.
7. J. W. Shelton and B. M. Reichman, «A comparative analysis of turbogenerator core inspection techniques», in *Proceedings of the American Power Conference, Chicago, USA, 22-24 April 1985*, pp. 643-650.
8. I. Lodge, «Flux testing of generator stator cores», *CEGB, SSD/NE/R293*, 1975.
9. IEEE Std 56-1977, «Guide for insulation maintenance of large alternating-current rotating machinery (10 000 kVA and Larger)», IEEE, USA, 1977 (reaffirmed 1991).
10. IEEE Std 62.2-2004, «Guide for diagnostic field testing of electric power apparatus», IEEE, USA, 2005.
11. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 «Норми випробування електрообладнання», ПАТ «Укренерго» Україна, 2007.
12. C. Maughan, 'Testing of turbine-generator stator core lamination insulation', in *EPRI 2004 Winter Workshop and Turbine & Generator Users Group (TGUG) Meeting, Albuquerque, USA, January 2004*, p. 6.
13. IEEE Std 1129-2014, 'IEEE Guide for online monitoring of large synchronous generators (10 MVA and above)', IEEE, USA, 2014

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МОДЕЛІ КОМПЛАНАРНОГО ЄМНІСНОГО СЕНСОРУ

В доповіді розглядається дослідження моделі компланарного сенсора [1, 2] засобами комп'ютерного моделювання Comsol Multiphysics, яке відбувалося в декілька етапів. На першому етапі, при моделюванні використовувалися електроди у формі прямокутників з нульовою товщиною. Приймалось, що довжина прямокутних електродів набагато більша, ніж ширина, а проведені дослідження в роботі [2] підтвердили, що розподіл електричного уздовж низькопотенціального електрода можна вважати квазістационарним. Виходячи з цього, 3D-геометрія задачі може бути зведена до 2D моделі. У цьому разі модель сенсора складається із плоских геометричних фігур: високопотенціального та низькопотенціального електроду ($b_1 = b_2 = b = 12\text{мм}$), охоронного електроду ($s = 2\text{мм}$) та металевої заземленої підкладка, що імітує поверхню полюса ротора, для реалізації яких використовується вузол Geometry. Для конкретної моделі були використані такі матеріали як повітря, для областей між електродами та заземленою поверхнею полюса ротора і мідь, як основний матеріал електродів. Властивості матеріалів для усіх фізичних областей моделі задаються в модулі Materials.

Електричні властивості створених елементів моделі задається у вузлі Electrostatics. Так як функція перетворення зводиться до визначення напруженості електричного поля E і щільності електричного потоку D , то для статичного електричного поля повинні виконуватися дві умови. Перша умова - потік електричного зміщення через замкнену поверхню дорівнює заряду, укладеним всередині неї (закон Гаусса в диференціальній формі):

$$\nabla \cdot D = \rho_V, \quad (1)$$

де ρ_V - об'ємна щільність електричних зарядів.

Друга умова - закон Ампера для статичного електричного поля в диференціальній формі:

$$\nabla \times E = 0. \quad (2)$$

Електричне зміщення і напруженість електричного поля пов'язані між собою співвідношенням:

$$D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E \quad (3)$$

де ε_0 та ε_r - абсолютна і відносна діелектрична проникність речовини.

Дана програма розглядає тільки лінійні залежності між напруженістю і зміщенням. Для спрощення обчислення поля і задоволення двох вищевказаних умов (2, 3), програма використовує співвідношення:

$$E = -\nabla \cdot V, \quad (4)$$

де V - різниця потенціалів.

У цьому випадку умова (3) виконується завжди, так як $\nabla \times \nabla \cdot V \equiv 0$, а умова (4) - закон Гаусса - приводить до рівняння:

$$-\nabla \cdot (\varepsilon \cdot \nabla \cdot V) = \rho_V \quad (5)$$

Для подальших розрахунків, у вузлі Mesh дерева моделі виконується триангуляція обраних областей для побудова скінченно-елементної сітки. На рис. 1 показано реалізовану імітаційну CAD-модель сенсора із сіткою, яка містить 4155 елементів.

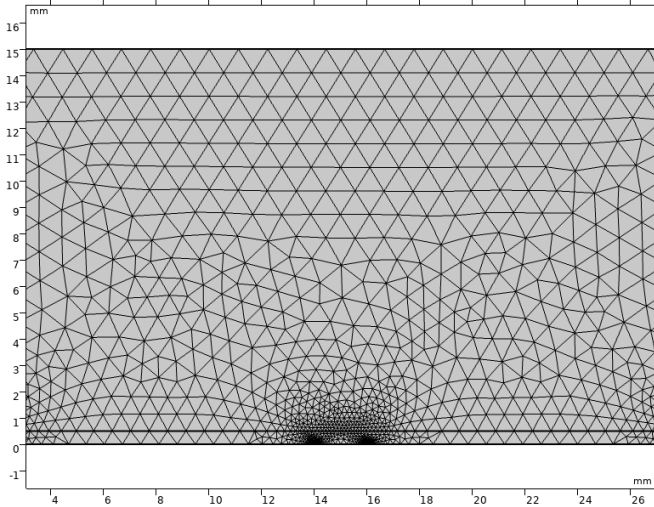


Рис. 1 – Скінченно-елементна сітка моделі сенсору

1. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Novik A.I., Bereznichenko V.O. & Smyrnova A.M. Research of a capacitive distance sensor to grounded surface. *Telecommunications and Radio Engineering*, 78(2):5-18 (2019) P.173-180. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80
2. Gorbova Galina M. Analysis capacitance and linearity gauge characteristic of coplanar micro-displacement sensor / Galina M. Gorbova, Mikhail M. Gorbov, Gerard C.M. Meijer // Proceeding XVII IMECO World Congress, June 22–27, 2003, Dubrovnic, Croatia. TC15. P. 1965–1968
3. Березниченко В.О., Зайцев Є.О. Безконтактний ємнісний сенсор системи контролю параметрів биття валів потужних електричних машин. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. Вип. 57. С. 81–88. DOI: 10.15407/publishing2020.57.081.

**ВИМОГИ ДО ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ОСЕРДЯ СТАТОРА
ПОТУЖНИХ ГЕНЕРАТОРІВ**

Швидке зростання в Україні (а також в країнах СНГ, Європи та Америки) долі генераторного обладнання, яке виробило вказаний в нормативних документах строк служби, зниження темпів вводу нового обладнання, декорбонізація виробництва енергії та перехід до енергії із відновлювальних джерел енергії, все зростаючі вимоги до економічності та надійності його експлуатації, створюють проблеми, які потребують негайного вирішення. Важливим аспектом вирішення зазначеної задачі є контроль технічного стану ПГ. Адже, на сьогодні в Україні знаходяться в експлуатації 30 ТГ типу ТГВ-200, 4 ТГ типу ТГВ-200Д, 11 одиниць ТГВ-200М потужністю 200 МВт та 41 ТГ типу ТГВ-300 потужністю 300 МВт. Термін служби цих машин у відповідності з нормативною документацією складає 25÷30 років. До цього часу 26 ТГ типу ТГВ-200 знаходяться в експлуатації на протязі 35÷50 років (тобто відпрацювали свій ресурс), 8 ТГ експлуатуються 20÷29 років; 38 ТГ типу ТГВ-300 із 42 знаходяться в експлуатації 35÷48 років і 4 ТГ – 22÷29 років [1].

Технічний стан статора потужних турбогенераторів (ТГ) характеризується багатьма параметрами, серед яких вирішального значення набувають параметри, що характеризують статор як механічну систему. Однією із основних механічних властивостей статора, що визначає його працездатність, є наданий йому в процесі виготовлення стан пружного стиснення осердя, який після виготовлення забезпечується за допомогою натискних плит і стяжних призм. З часом, внаслідок експлуатаційних навантажень, виникає зниження зусиль, що стискають осердя. Це призводить до втрати запасу працездатності і є потенційною причиною виникнення небезпечних дефектів статора [2, 3].

Зазвичай електротехнічні фірми світу застосовують електромагнітний контроль активної сталі (EL CID), який дозволяє контролювати активну сталь без виведення ротора із статора. Такий метод контролю може бути застосований виключно при виїнятому роторі в період ремонту генератора, як і більшість інших методів приведених в таблиці 1.4. Як було зазначено раніше періодичне діагностування знижує імовірність аварії, але не гарантує виявлення дефектів, що можуть виникати в міжремонтний період. Так, наприклад, як відомо із [4], що навіть коротке замикання 25 ламелей одного пакету осердя статора буде призводити до появи напруги на валу в 25мВ рівень якої дуже малий в порівнянні із напругою на валу та може бути інтерпретована лише як 50 мкм ексцентриситету ротора при використанні діагностичних моделей на основі визначення небалансів між напругами в обмотці статора. У цьому разі результати обробки вимірювання напруг свідчать лише про вже

наявний процес плавлення осердя статора, який призводить до тривалого ремонту. Тобто контроль та діагностування фактичного стану осердя статора під час його експлуатації не можливо повноцінно здійснити лише за оцінкою напруг на валу, через те, що вони занадто малі для виявлення дефектів осердя на ранній стадії.

Адже, ключовим у розв'язку проблеми підвищення ефективності контролю та діагностування осердя статора потужного ТГ є необхідність успішного вирішення завдання балансування між системними вимогами, що враховують складний характер об'єкта дослідження та інтегральною вартістю всіх компонентів системи діагностування по відношенню до вартості нового ТГ. Останнє і створює проблему, яка може бути вирішена лише за допомогою системи контролю та діагностики, яка повинна містити в собі ефективні методи і засоби виявлення дефектів, особливо під час роботи машини.

Одним із головних шляхів поліпшення методів контролю і діагностики потужних ТГ є розв'язання актуального науково-прикладного завдання із удосконалення існуючих та розробка нових компонентів інформаційно-вимірювальних систем визначення експлуатаційних параметрів ТГ і організація їх промислового виробництва.

Для вирішення поставленого завдання компоненти інформаційно-вимірювальних систем контролю та діагностики повинні задовольняти наступним вимогам:

- створення передумов для істотного зниження технологічних порушень і запобігання великих аварій;

- забезпечення можливості доступу до всієї вертикалі керування достовірною інформацією про технічний стан устаткування в масштабі реального часу;

- одержання та обробки масиву діагностичної інформації про стан устаткування, необхідного і достатнього для організації ремонтно-експлуатаційного обслуговування обладнання, підтримання технічного стану та керування ресурсом устаткування;

- одержання економічного ефекту за рахунок:

- а) скорочення інвестиційних витрат на необґрунтоване відновлення устаткування і його комплексне обстеження;

- б) скорочення чисельності персоналу, як результат впровадження автоматизованих методів діагностики;

- в) зниження витрат на проведення ремонтів;

- зменшення витрат на страхування обладнання, оскільки страхові компанії встановлюють різні страхові відсотки залежно від наявності або відсутності систем контролю та діагностики обладнання;

- г) скорочення випадків недопостачання електроенергії з вини обладнання, яке відмовило;

д) скорочення випадків штрафних санкцій з боку споживача за заподіяний збиток, у тому числі екологічний, через вихід з ладу обладнання.

Вирішення наведених задач зазвичай відбувається в декілька етапів в процесі створення та впровадження системи технічної діагностики генераторів. На першому етапі розроблюється система з використанням добре відомих і відпрацьованих методів визначення стану вузлів і елементів електромашини. На наступних етапах, у міру відпрацьовування та перевірки в експлуатації інших методів визначення стану генератора, до системи діагностики першої черги можуть приєднуватися відповідні сенсори та прилади. При цьому майбутні розробки і дослідження необхідно сконцентрувати на вирішенні наступних основних науково-дослідних завдань: збиранню і всебічному аналізу інформації про нормальні та екстремальні експлуатаційні параметри та режими, несправності генератора і допоміжного устаткування; створенню нових сенсорів для виявлення діагностичних ознак, у тому числі для виявлення ступеня ушкодження деталей і матеріалів (зношувань, деформацій, тріщин, стану ізоляції, ступеня корозії та ін.), а також для виявлення непрямих діагностичних ознак (вібрації, шумів, динамічних навантажень, продуктів піролізу, запилення, продуктів зношування в охолоджувальному газі та ін.); розробці методів підвищення вірогідності інформації, яка видається системами контролю та діагностики; розробці методів вбудованого автоматизованого діагностування самих систем.

Створення систем, що забезпечують вирішення вище перерахованих ви-мог дозволить знизити експлуатаційні витрати й продовжити термін служби основного обладнання ГЕС, ГАЕС, ТЕС та АЕС.

1. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій / Зозулін Ю.В., Антонов О.Є., Бичік В.М. та ін. Харків: ПФ «Колегіум», 2011. 228 с.
2. Зайцев Є.О., Левицький А.С., Панчик М.В. Особливості процесу пресування осердя статора потужного турбогенератора. Електромеханічні та енергетичні системи. *Методи моделювання та оптимізації*: Збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, 11-12 квітня 2019 м. Кременчук, Україна, 2019. С.81-83.
3. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Capacitive distance sensor with coplanar electrodes for large turbogenerator core clamping system. *Proceedings of the 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, April 16 – 18, 2019, Kiev, Ukraine. P.644-647.
4. Jackson R.J., Renew D.C., Brown M. L. The use of shaft voltage measurements to monitor turbogenerator stator cores. *CERL. RD/L/N 32/80*. 1980.

**ВИМІРЮВАЧ БИТТЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ВАЛІВ
ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ ІЗ ЄМНІСНИМ КОМПЛАНАРНО
КОНЦЕНТРИЧНИМ СЕНСОРОМ**

На сьогоднішній день, інтеграція ОЕС України до загальноєвропейської енергосистеми ENTSO-E – одна з ключових стратегічних цілей НЕК “Укренерго”, що передбачена Угодою про Асоціацію між Україною та ЄС. Кооперація енергосистем дозволяє забезпечити енергетичну безпеку, синхронізувати їх спільну роботу, підвищити надійність та стійкість роботи ОЕС України, розширити можливості обміну електроенергією між суміжними країнами, посилити конкуренцію на внутрішньому ринку та створити можливості для роботи на енергетичному ринку Європи [1].

Для забезпечення успішної інтеграції до енергосистеми ENTSO-E є необхідним забезпечення надійної та безаварійної роботи енергетичного устаткування ОЕС України та забезпечення прогнозованого виробництва електроенергії з можливістю покриття небалансів, що можуть виникати на енергоринку. Тому, актуальним є забезпечення надійної та безаварійної роботи її генеруючого обладнання.

Більша частина, якого була введена в експлуатацію більше 50 років тому та майже виробили свій термін служби та потребують оновлення, що не є можливим в умовах світової економічної кризи та пандемії. Одним із способів забезпечення збільшення терміну експлуатації є використання систем віддаленого моніторингу та діагностики основних параметрів, одним із яких для потужних генераторів є радіальне биття валів. Для отримання первинної інформації в системах використовуються спеціалізовані сенсори. При цьому враховуючи різноманіття типів потужних генераторів, що використовуються в ОЕС України викликає потребу в розробці сенсорів з урахуванням конструктивних особливостей генераторів та досліджень їх первинних та вторинних перетворювачів.

У зв'язку з цим, дана робота присвячена розгляду ємнісного сенсора радіального биття та розрахунку параметрів його вторинного вимірювального перетворювача.

Схема ємнісного сенсора з концентричними компланарними електродами представлена на рис.1. Сенсор складається з таких основних частин: активного високопотенціального електрода 1 радіусом r , низькопотенціального електрода 3 шириною b , між якими розташований низькопотенціальний охоронний електрод 2 шириною s . Електроди 1, 2 і 3 відокремлені один від одного тонкими діелектричними проміжками шириною h , яка залежить від технології виготовлення. Завдяки малій величині електричне поле між елект-

родами 1 і 4 в кожному радіальному перетині набуває однакової форми [2, 3].

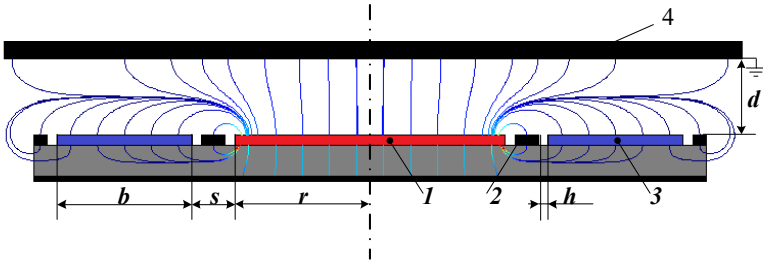


Рис. 1 – Схема вимірювання відстані до заземленої поверхні емнісним сенсором з концентричними компланарними електродами

Електрична емність між електродами 1 і 3 розраховується, як сума двох емностей: робочої C_w через повітряний проміжок та паразитної C_d , через діелектричну підкладку. Оскільки паразитна емність є постійною ($C_d = \text{const}$), а робоча емність C_w буде змінюватись зі зміною відстані d , тобто $C_w = f(d)$. Для її розрахунку використаємо результати досліджень визначення емності C_L на одиницю довжини між двома компланарними паралельними електродами, розділеними низькопотенціальним охоронним електродом [4,5]. З урахуванням, що $r = b$ отримаємо

$$C_L = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \left(\frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{\left(4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} \right)} \right), \quad (1)$$

де: $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму; $\varepsilon_r = 1,00056$ – відносна діелектрична проникність повітря; $r = b$ – ширина електродів 1 і 3; s – відстань між електродами 1 і 3; d – відстань між площиною електродів 1,2, 3 і 4.

Загальна робоча емність сенсора C_w з урахуванням того, що довжина середньої лінії між електродами 1 і 3 складає $L_{hc} = 2\pi R = 2\pi(b+s/2)$, дорівнює

$$C_{whc} = 2\varepsilon_0 \varepsilon_r \left(b + \frac{s}{2} \right) \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}. \quad (2)$$

При використанні емнісного сенсорів з концентричними компланарними електродами, для забезпечити високих метрологічних характеристик, в тому числі точності, роздільної здатності та швидкодії є необхідною розробка вторинного вимірювального перетворювача (ВВП) «емність - напруга», схема якого приведена на рис. 2.

ВВП реалізований на основі частотно-незалежного вимірювального кола, на базі операційного підсилювача NE5532 (Texas Instruments). Вихідний

сигнал такого ВВП пропорційний ємності, що вимірюється та є незалежним від частоти вхідного сигналу.

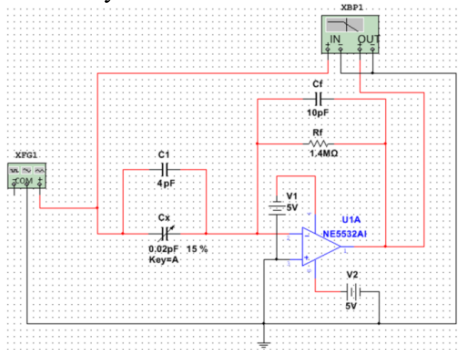


Рис. 2 – Схема ВВП:

C_x – ємність, що вимірюється, C_1 – шунтуюча ємність;
 U1A – операційний підсилювач, R_f та C_f – опір та ємність зворотного зв'язку;
 XPG1 – генератор тестового сигналу; XBP1 – вимірювач коефіцієнту передачі;
 V_1, V_2 – джерела живлення

У цьому разі вихідна напруга перетворювача розраховується як [6]

$$U_o(t) = -\frac{j\omega C_x R_f}{j\omega C_f R_f + 1} \cdot U_i(t) \quad (3)$$

де $U_i(t)$ та $U_o(t)$ – вхідний та вихідний сигнал, $\omega = 2\pi f$, де f – частота сигналу.

У разі виконання умови $|j\omega C_f R_f| \gg 1$, вираз (3) в спрощеному вигляді запишеться як

$$U_o \approx -\frac{C_x}{C_f} \cdot U_i \quad (4)$$

Для аналізу динамічних характеристик перетворювача, визначимо його функцію перетворення, як відношення вхідного та вихідного сигналів. У цьому разі, скориставшись виразом (3) отримаємо зображення коефіцієнта передачі [7]

$$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{sC_x R_f}{sC_f R_f + 1} = \frac{C_x}{C_f} \left(\frac{1}{sC_f R_f + 1} - 1 \right) \quad (5)$$

Щоб забезпечити точність вимірювання, прийнятну в широкому діапазоні вимірювань, чутливість перетворювача повинна бути високою. Чутливість визначається як

$$S_{cv} = U_o / C_x \quad (6)$$

де U_o - абсолютне значення величини $U_o(t)$.

При підстановці у рівняння (3) рівняння (6), ми отримаємо такі результати

$$S_{cv} = \left| \frac{j\omega R_f U_i(t)}{j\omega C_f R_f + 1} \right| = \frac{\omega R_f U_i}{\sqrt{(\omega C_f R_f)^2 + 1}} \quad (7)$$

де U_i - абсолютне значення вхідного сигналу $U_i(t)$.

Для розрахунку чутливість перетворювача врахуємо те, що вихідний сигнал перетворювача повинен бути нижче діапазону аналогового входу АЦП (наприклад: $3,3 B$ або $5 B$), а також максимальне значення ємності. Оскільки значення ємності, що вимірюється є дуже малою величиною, яка становить $0,02 n\Phi$. Визначення ємностей таких порядків потребує використання або додаткових швидкодіючих елементів, які можуть привести до появи похибок перетворення, або використання комбінації ємностей для її масштабування. Для досягнення мети зменшення габаритів ВВП та його розташування в безпосередній близькості до первинного вимірювального перетворювача, як це запропоновано в [8] використаємо другий шлях – масштабування за допомогою застосування конденсатора $C1$. В такому випадку максимальне значення оберемо близьким до стандартного діапазону вимірювання в $4 p\Phi$ перетворювача ємність-код AD7745 / AD7746 та AD7747 виробництва Analog Devices, Inc. (Norwood, MA, USA)[9].

У цьому разі чутливість перетворювача $S_{cv} = 3,3 B / 4 n\Phi = 0,83 B / n\Phi$.

Прийнявши до уваги, що частота генераторів стандартних RLC-метрів становить $10 kГц$, и $100 kГц$, а напругу частоти вимірювального генератора оберемо рівною напрузі входу АЦП, то для визначення R_f та C_f відповідно опору та ємності зворотного зв'язку операційного підсилювача ВВП.

Приймаючи до уваги, що у відповідності до виразу (4) для отримання $U_o \approx U_i$ при максимальному значенні C_x достатньою умовою є забезпечення $C_f = C_x = 4n\Phi$, тоді $R_f = 1,4 M\Omega$.

Отримана АЧХ для схема ВВП (рис.2) при використанні отриманих параметрів R_f та C_f приведена на рис.3. Як видно з рис.3 оптимальним діапазоном для вимірювального генератору, що входить до складу ВВП є діапазон від $100 kГц$ до $1 MГц$. Використання генераторів зазначеної частоти дозволить вимірювати вібраційні складові параметрів биття валів у досить широкому діапазоні.

Висновки: В роботі було розглянуто конструкцію сенсора, який складається з первинного перетворювача ємнісного типу з концентричними компланарними електродами та вторинного вимірювального перетворювача для визначення параметрів радіального биття. ВВП реалізований на основі частотно-незалежного вимірювального кола, на базі операційного підсилювача, з вихідним сигналом пропорційним ємності, яка вимірюється. За результатами досліджень, були обрані параметри схеми ВВП та діапазон вимірювального генератору, який складає від $100 kГц$ до $1 MГц$. Використання ВВП дозволяє

вимірювати вібраційні складові параметрів биття валів у досить широкому діапазоні.

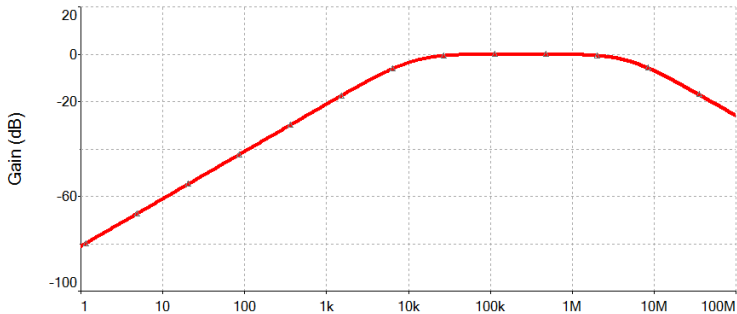


Рис. 3 – Амплітудно-частотна характеристика ВВП

1. Національна енергетична компанія Укренерго URL: <https://ua.energy/evvointegratsiya/integratsiya-do-entso-e/#1593010393373-8120ccb2-c9d4> (дата звернення: 05.01.2021).
2. Левицький А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П. Контроль стану потужних гідро-та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів: монографія. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. 242 с.
3. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Novik A.I., Bereznychenko V.O. & Smyrnova A.M. Research of a capacitive distance sensor to grounded surface. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. No 78 Vol. 2. Pp.173-180. DOI: [10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80](https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80)
4. Gorbova G. M., Gorbov M. M., Meijer G.C.M. Analysis capacitance and linearity gauge characteristic of coplanar micro-displacement sensor. *Proceeding XVII IMEKO World Congress Metrology in the third millennium*. Dubrovnic, Croatia, 22–27 June 2003. TC15. Pp. 1965-1968.
5. Левицький А.С., Зайцев С.О., Кромпляс Б.А. Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору в гідрогенераторі СГК 538/160-70М. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. № 43. С.134–136.
6. Карандеев К.Б. Специальные методы электрических измерений: навч. посіб. М.: Госэнергоиздат, 1963. 344 с.
7. Макаров И.М., Менский Б. М. Линейные автоматические системы: монографія. М.: Машиностроение, 1982. 504 с.
8. Березниченко В.О., Зайцев С.О. Безконтактний ємнісний сенсор системи контролю параметрів биття валів потужних електричних машин. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. №. 57. С. 81–88. DOI: [10.15407/publishing2020.57.081](https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.081).
9. AD7745/46 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor. 2019. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7745_7746.pdf (дата звернення: 20.12.2020).

Філоменко А.А.

КЕРУВАННЯ ТРАЕКТОРІСІЮ РОТОРА ДВИГУНА ЗВОРОТНО-ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ У РОЗІМКНЕНІЙ СИСТЕМІ

Існує особливий клас електромеханічних пристроїв для яких необхідно реалізувати зворотньо-обертальний рух виконавчого елемента. Це, наприклад, медичний або металообробний ручний інструмент, до якого висуваються особливі вимоги за технічними характеристикам, надійності та безпеки. Найкращий результат побудови ефективних пристроїв зворотньо-обертального руху за енергоспоживанням та мінімізацією габаритів дає використання магнітоелектричної схеми побудови приводного двигуна.

Регулювання параметрами зворотньо-обертального руху ротора [1] можна досягти використовуючи замкнену систему керування, у якій необхідно формувати відповідні сигнали зворотних зв'язків, що суттєво ускладнює апаратну частину системи [2]. Вхідним керуючим сигналом системи є напруга статора синусоїдальної $u = U_A \sin 2\pi f_o t$ або прямокутної форми $u = 0,5 U_A (\text{sign}(\sin(2\pi f_o t - 0,5\varphi_1)) + \text{sign}(\sin(2\pi f_o t + 0,5\varphi_1)))$, де U_A – амплітуда напруги статора; f_o – основна частота коливань ротора; φ_1 – кутова довжина нульової ділянки напруги прямокутної форми; t – час. Основні вихідні параметри системи, які описують режим роботи БМД зворотньо-обертального руху є: f_o – частота коливань ротора 1-100 Гц; α_A – величина амплітуди кута коливань ротора ± 20 градусів; I – діюче значення змінного струму статора; ω_A – амплітуда кутової швидкості ротора. Траєкторія зворотньо-обертального руху визначається також формою зміни миттєвого значення цієї напруги.

Внаслідок нелінійних властивостей розглянутої системи БМД зворотньо-обертального руху, її функціонування на основній частоті f_o в заданому діапазоні до 100 Гц може здійснюватися в одному із двох режимів роботи: - у діапазоні низьких частот (до 20-30 Гц) – у режимі обмеження амплітуди кута коливань ротора на заданому рівні α_3 ; - у діапазоні високих частот (більше 20-30 Гц) – у режимі обмеження діючого значення струму статора на максимально припустимому рівні I_{\max} , обумовленому припустимим тепловим станом двигуна.

Показниками ефективності роботи БМД зворотньо-обертального руху є параметри:

$$k_1 = \frac{\alpha_A}{I^2} - \text{характеризує втрати в статорній обмотці при заданому куті}$$

коливання ротора двигуна;

ω_A – амплітуда кутової швидкості ротора, максимум якої забезпечує форований режим роботи двигуна.

Аналіз електромеханічних характеристик [3] безконтактного магнітоелектричного двигуна (БМД) зворотно-обертального руху показує, що жоден із варіантів формування змінної напруги статора з фіксованими параметрами не дозволяє забезпечити максимум жодного з параметрів ефективності режиму роботи БМД у всьому частотному діапазоні. У той же час можна зробити висновок про можливість вибору оптимальних параметрів змінної напруги статора на кожному значенні основної частоти i , таким чином, сформувати функціональні частотні залежності параметрів напруги для реалізації режиму зворотно-обертального руху ротора БМД у розімкненій структурі.

Відзначимо особливості досліджуваного підходу до формування функціональних частотних залежностей:

- керування зворотно-обертальним рухом ротора здійснюється за умови забезпечення максимальної величини одного з критеріїв ефективності режиму роботи БМД: k_1 або ω_A ;

- формування функціональних залежностей передбачає складання залежностей амплітуди U_A та параметра форми φ_1 напруги статора від частоти коливань f_o ротора з урахуванням прийнятого критерію ефективності режиму роботи k_1 або ω_A у всьому частотному діапазоні при заданих значеннях амплітуди коливань α_3 та діючого значення струму I_3 ;

- складання таких залежностей здійснюється на підставі електромеханічних характеристик БМД зворотно-обертального руху.

Визначимо послідовність формування функціональних частотних залежностей у вигляді $U_A(f_o)$ та $\varphi_1(f_o)$:

1. Для заданого ряду значень основної частоти f_o при заданих значеннях амплітуди кута коливань ротора α_3 і діючого значення струму статора I_3 на підставі математичної моделі [4] виконується розрахунок показників ефективності k_1 і ω_A , а також амплітуди U_A для синусоїдальної та прямокутної форм напруги статора в залежності від параметра φ_1 .

2. Далі для кожного з показників якості k_1 і ω_A визначаються їхні максимальні значення та фіксується значення амплітуди напруги U_A тієї форми, що виявляється кращою за одним із показників якості, у випадку вибору прямокутної змінної напруги статора фіксується відповідне значення параметра форми φ_1 ;

3. Для показників якості k_1 і ω_A формуються залежності $U_A(f_o)$ та $\varphi_1(f_o)$ (для прямокутної напруги), причому у всьому робочому діапазоні частоти f_o

можуть виявитися трохи піддіапазонів використання різних форм змінної напруги.

На рис. 1 наведено сформовані функціональні залежності $U_A(f_o)$ і $\varphi_1(f_o)$, а також відповідні їм залежності показників якості $k_1(f_o)$ та $\omega_A(f_o)$ в абсолютних одиницях для двигуна з параметрами, що наведені у [1]. Літерами А і Б позначено відповідно варіанти формування синусоїдальної та прямокутної форм напруги.

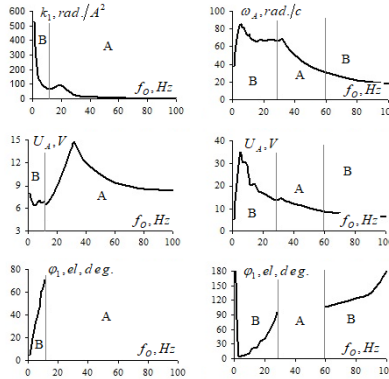


Рис. 1 – Функціональні залежності

Використання функціональних частотних залежностей $U_A(f_o)$ і $\varphi_1(f_o)$ дозволяє реалізувати режим зворотно-обертального руху ротора БМД за допомогою розімкненої структури без використання зворотних зв'язків, що мінімізує її апаратну частину. Формування напруги статора з різними параметрами дозволяє забезпечити режими роботи БМД зворотно-обертального руху або при мінімізації втрат в обмотці статора, або при забезпеченні максимальної величини амплітуди кутової швидкості валу ротора у форсованому режимі роботи.

1. Akinin K.P., Antonov A.E., Kireyev V.G., Filomenko A.A. Return-rotary motion control system of rotor of brushless magnetoelectric motor. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2020. № 55. С. 67–71.
2. Ивей К.А. Системы автоматического управления на несущей частоте переменного тока. Москва: Машиностроение, 1968. 320 с.
3. Акинин К.П., Киреев В.Г., Филоменко А.А., Лавриненко В.А., Михайлик Е.М. Исследование электромеханических характеристик бесконтактных магнитоэлектрических двигателей возвратно-вращательного движения. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 54. С. 47–51.
4. Антонов А.Е., Петухов И.С., Филоменко А.А. Магнитоэлектрический двигатель возвратно-вращательного движения с упругой связью ротора. *Технічна електродинаміка*. 2013. №1. С. 49–55.

ВИЯВЛЕННЯ ТА ЗАМІНА АНОМАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ В ВИХІДНИХ ДАНИХ ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ ВУЗЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

При побудові статистичних моделей електричного навантаження вирішальне значення має якість вихідної інформації. Наявність пропусків та аномально великих значень в ряді даних на якому проводиться оцінка параметрів моделі призводить до недостатнього узагальнення характеру процесу та виникнення систематичних похибок.

Спотворені дані та пропуски присутні при звичайній роботі енергосистеми. Вони можуть бути пов'язані з помилками вимірювань, перешкодами в інформаційному тракті або людським фактором. За своїм характером вони можуть бути одиночні і групові. При побудові математичних моделей для прогнозування, різкі зміни навантаження які викликані аварійними відключеннями або раптовими технологічними чинниками у великих споживачів слід відносити до аномальних значень, оскільки вони не відображають взаємозв'язок між навантаженням та зовнішніми факторами, які використовуються в моделі.

Підвищення автоматизації енергосистеми, втілення ідей концепції Smart Grid на практиці та підвищення кількості просьюмерів, стимулює до ускладнення інструментів аналізу даних та визначення аномальних значень.

Порівняльний аналіз результатів роботи методів виявлення аномальних даних показав, що більшість методів кластеризації здатні виявляти аномальні значення та в деяких випадках пропущені значення. Метод DBSCAN [1] гарно справляється із значними аномальними викидами, але при тривалих спотвореннях даних алгоритм ігнорує ці значення. Для покращення роботи даного алгоритму необхідно масштабувати та змінювати розмірність вхідних даних. Метод «Ізольованих лісів» [2] виявляє аномальні значення у два етапи, спочатку будуються ізольовані дерева за допомогою рекурсивного розбиття вибірки, випадковим чином обираючи атрибути, після чого випадковим чином обираються критичні значення розподілу для атрибутів між мінімальним та максимальним значенням. Метод EE [3] здатний виявляти як аномальні, так і пропущені дані, але при великих об'ємах ретроспективних даних алгоритм спотворює нормальні дані за усередненим значенням усієї вибірки.

Враховуючи переваги та недоліки наведених алгоритмів кластеризації для подальшого використання вирішено використовувати метод DBSCAN, який об'єднує в собі високу точність та специфічність визначення аномальних викидів та ефективність, з точки зору використання обчислювальних ресурсів.

Подальший аналіз виявив, що алгоритми на базі кластеризації роблять значну кількість хибно позитивних спрацювань у вузлах зі значною добовою та тижневою періодичністю. Для розв'язання даної задачі запропоновано використовувати метод декомпозиції часових рядів з допомогою двосторонніх ковзних середніх з різною глибиною усереднення.

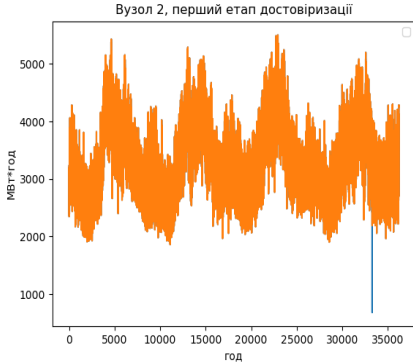


Рис. 1 – Заміна аномальних значень за допомогою інтерполяції

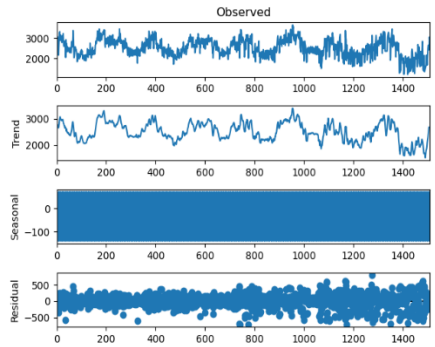


Рис. 2 – Декомпозиція часового ряду на трендову, сезонну та залишкову складові

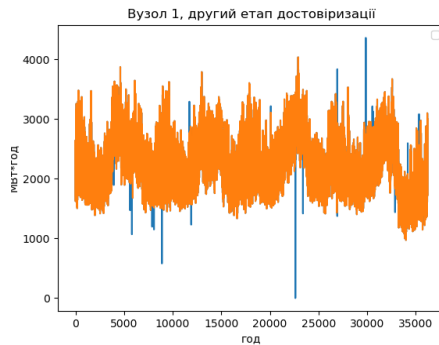


Рис. 3 – Заміна виявлених значень за допомогою лінійної інтерполяції

Заключний алгоритм виявлення та заміни аномальних даних для одного вузла складається з наступних етапів:

1. Виділення часових зрізів з суцільного часового ряду навантаження $\mathbb{R}^{n \times 1} \rightarrow \mathbb{R}^{\frac{n}{24} \times 24}$.
2. Виявлення в часових зрізах грубих аномальних значень за допомогою методу кластеризації DBSCAN. Аномальними приймаються значення які не відносяться до першого кластеру.
3. Заміна аномальних значень за допомогою інтерполяції (рис. 1).

4. Розгортка часових зрізів в суцільний ряд навантаження $\mathbb{R}^{\frac{n}{24} \times 24} \rightarrow \mathbb{R}^{n \times 1}$.

5. Декомпозиція часового ряду на трендову, сезонну та залишкову складові (рис. 2).

6. Виявлення аномальних значень (пункт 2) в часовому ряді залишкової складової.

7. Заміна виявлених значень за допомогою лінійної інтерполяції (рис. 3).

Для оцінки похибки прогнозу використовувались погодинні дані за період з 2015 по 2019 рр. про електричне навантаження розподільчих енергосистем Північно-Західного регіону США, 10 вузлів. Всі дані було розділено на навчальну та тестову вибірки. Останні 744 погодинних значень, які не використовувались для навчання моделі, віднесено у тестову вибірку на якій розраховувались значення показника MAPE.

Таблиця 1

Результати прогнозування

Вузли	з аномальними значеннями	без аномальних значень
Мінімальна похибка	4,1	3,6
Максимальна похибка	117,2	7,8
Середня похибка	17,3	5,8
Стандартне відхилення похибки	35,1	1,6

В таблиці 1. наведено результати прогнозування мережі net1 на даних до та після усунення аномальних значень. В якості оцінки похибки прогнозу використовується середньо абсолютна похибка MAPE.

Наведені результати показують, що усунення аномальних значень значно знижує середню похибку прогнозу з 17,3% до 5,8% та підвищує стабільність прогнозів, зниження стандартного відхилення похибки з 35,1% до 1,6%.

1. Ester M., Kriegel H.P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*. AAAI Press, 1996, pp. 226–231.
2. Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z. Isolation Forest. *2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining*, Pisa, Italy, 2008, pp. 413–422, doi: 10.1109/ICDM.2008.17.
3. Breunig M.M., Kriegel H.P., Ng R.T., Sander J. LOF: identifying density-based local outliers. *ACM Sigmod Record* 29, 2000, pp. 93–104. 10.1145/342009.335388.

ВДОСКОНАЛЕНИЙ ЛМС-ФІЛЬТР В СТРУКТУРІ ОДНОФАЗНОГО ГІБРИДНОГО ФІЛЬТРА НА ВХОДІ ВИПРЯМЛЯЧА З ЄМНІСНИМ ФІЛЬТРОМ ТА АКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Велика кількість електротехнічних пристроїв здійснюють живлення свого навантаження від мостових випрямлячів з ємнісним фільтром [1]. Мостовий випрямляч споживає струм несинусоїдальної форми і є потужним нелінійним навантаженням для децентралізованих систем електропостачання (СЕР), погіршуючи параметри якості електроенергії мережі. Важливою і основною вимогою забезпечення ефективності функціонування та експлуатації децентралізованої СЕР, як системи з обмеженою потужністю, є дотримання нормованого рівня параметрів якості електричної енергії [2]. Тому електромагнітна сумісність мостових випрямлячів з децентралізованими СЕР є обов'язковою. Сучасна система «СЕР – споживач» (рис. 1) являє собою комплекс, що складається з децентралізованої мережі обмеженої потужності, яка має відносно великий опір короткого замикання ($Z_{K3} > 4\%$), мостового випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням і засобів узгодження вхідних кіл випрямляча з мережею живлення, які можуть бути реалізовані на основі силових фільтрів, приєднаних послідовно або паралельно до входу випрямляча.

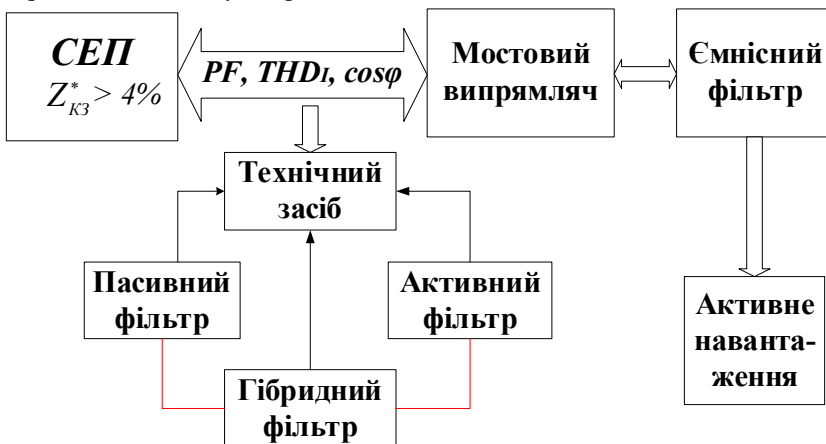


Рис. 1 – Сучасна система «СЕР – споживач»

Одним із шляхів вирішення проблеми електромагнітної сумісності мостового випрямляча з ємнісним фільтром та *СЕП* є встановлення гібридних фільтрів [3]. Вони являють собою схемне об'єднання активних та пасивних фільтрів, параметри яких відрізняються від параметрів, які вони мали б у випадку роздільного їх застосування при роботі на те ж навантаження. Така концепція перспективна як для індивідуальних навантажень, так і для варіативних поєднань на рівні всієї енергосистеми, адже дозволяє отримати бажаний рівень фільтрації, використовуючи структури розраховані на меншу встановлену потужність відносно потужності навантаження. В роботі [3] шляхом імітаційного моделювання в спеціалізованій програмі *Omega 2010*, розробленій в Інституті електродинаміки НАН України, досліджено однофазні варіанти гібридного фільтра, реалізованих в активній частині на основі активного коректора форми струму *АКФС*, а в пасивній частині в одному випадку з 3% лінійним реактором, а в другому – з широкосмуговим *ЛМС*-фільтром. Технічне рішення гібридного фільтра на основі структур *Л-ЛМС+АКФС* дозволило знизити діюче значення струму активного фільтра, а отже його масогабаритні показники і, відповідно, вартість. Однак, при застосуванні *ЛМС*-фільтра на вході випрямляча, на кривій споживаного струму виникають комутаційні сплески в моменти, коли випрямляч починає споживати струм з мережі. В роботі [4] було досліджено один з варіантів впливу на параметри комутаційного сплеску, який полягає в тому, що між поздовжньою обмоткою *ЛМС*-фільтра і входом випрямляча включається додаткова обмотка *Ld*. Шляхом імітаційного моделювання вдалося отримати значення обмотки *Ld*, при підключенні якої узгоджено до повдовжньої обмотки, досягається приглушення зазначеного сплеску струму.

Метою даної роботи є дослідження структури однофазного гібридного фільтру на основі *АКФС* та широкосмугового *ЛМС*-фільтра з додатковою обмоткою на вході мостового випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням в децентралізованих *СЕП*. На рис. 2 приведена схема гібридного фільтру, що складається з пасивного *ЛМС*-фільтра (з додатковою обмоткою *Ld*) та *АКФС*, який представлено паралельним з'єднанням джерел струму, що генерують струм активного коректора *I_{аф}*, який можна представити рядом Фур'є як суму гармонік різної амплітуди (позначено як *A_φ*).

Миттєве значення *I_{аф}* генерується як різниця між миттєвими значеннями повного струму навантаження та його першої гармоніки. Параметри схеми для моделювання були такими: $U_m=230$ В, частота напруги 50 Гц, потужність навантаження 10 кВт, ємність конденсатора фільтра $C_\phi=10$ мФ. *ЛМС*-фільтр представлено реактором з індуктивностями $L1=5,3$ мГн, $L2=1,23$ мГн, $Ld=0,8$ мГн та конденсатором з ємністю $C=170$ мкФ.

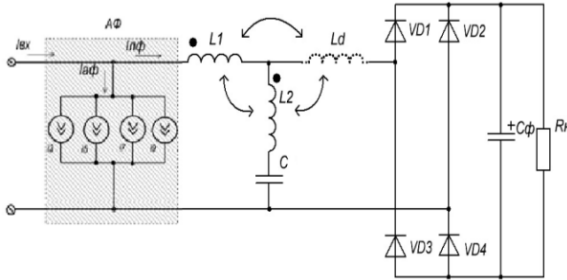


Рис. 2

Складання струму активного фільтру (I_{af}) зі струмом пасивного фільтру (I_{nf}) забезпечує споживання з мережі живлення вхідного струму (I_{ex}) синусоїдальної форми, що по фазі збігається з напругою мережі. Результати моделювання процесів, що виникають в такій схемі, представлено в табл.1.

Таблиця 1

Результати моделювання процесів

Варіанти	$I_{rms,вх},A$	$I_{m,вх},A$	$I_{rms,af},A$	$I_{m,af},A$	$I_{rms,пф},A$	$I_{m,пф},A$	U_n,B	I_n,A	$THD_1,\%$
1 LMC+AФ	50,82	72,54	8,76	19,15	51,41	85,4	290,4	34,4	1,73
2 LMC+Ld+AФ	49,31	69,96	5,74	10,45	49,77	62,43	286	35,2	1,65

Для розглянутого пристрою діюче значення струму I_{af} (*r.m.s.*) визначається як

$$I_{af} = \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots + I_n^2}, \quad (1)$$

де $I_3 \dots I_n$ — діючі значення струмів гармонік, n — номер гармоніки (включно до $50\text{-}i$). Таким чином, встановлена потужність для структури LMC+AФ складає $S_{af} = 8,76 \times 230 = 2 \text{ кВА}$, тобто становить 20% потужності навантаження. Саме вона визначає в основному вартість гібридного фільтра. Для структури LMC-фільтра з додатковою обмоткою L_d це значення становить $1,3 \text{ кВА}$, тобто становить 13% потужності навантаження (див. табл. 1, варіант 2).

Головну перевагу вдосконаленого LMC-фільтра ілюструють епюри, що зображено на рис.3 та рис.4. На рис. 3 зображено спектр струму LMC-фільтра до (рис.3 а) та після (рис.3 б) вдосконалення.

Рівень третьої гармоніки струму хоч і зріс (рис.3 б), проте вдалося зменшити всі інші рівні гармонік, починаючи з сьомої, за рахунок чого і зменшилася встановлена потужність АКФС (формула 1). Це відображається на формі струму LMC-фільтра (рис. 4 а – «до» та рис.4 б – «після» вдосконалення). Можна відзначити, що амплітуда сплеску струму визначає максимальне відхилення від форми першої гармоніки вхідного струму споживання з мережі живлення, так в табл.1 значення $I_{m,af}$ та $I_{m,nf}$ значно менші для 2го варіанту структури.

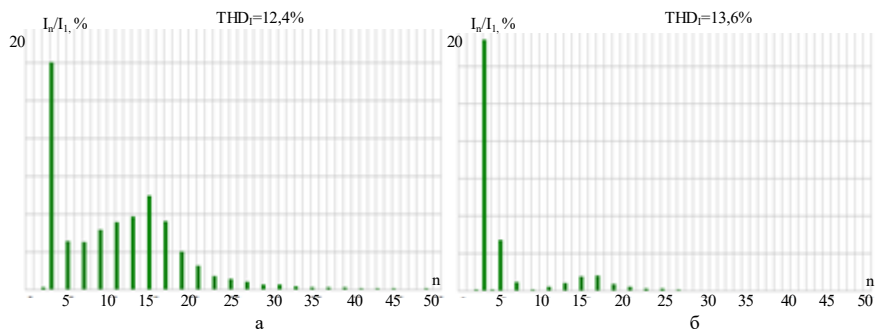


Рис. 3

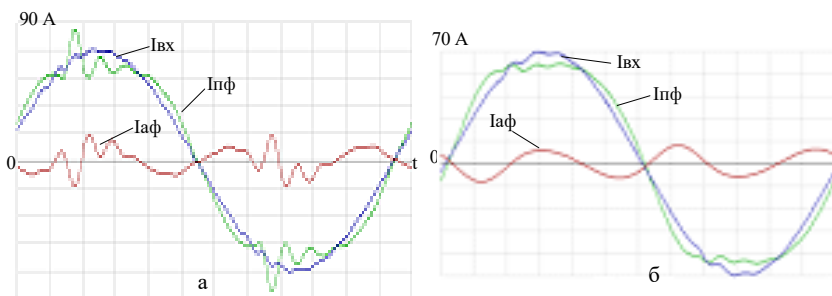


Рис.4

Крім того, від крутизни наростання і спаду сплеску залежить THD_I вхідного струму, а також частота роботи інвертора коректора, бо щоб якісно компенсувати сплески струму навантаження потрібно цю частоту збільшувати, а це призводить до збільшення динамічних втрат напівпровідникових елементів інвертора.

1. В. К. Bose. Modern Power Electronics and AC Drives / В. К. Bose. — Prentice Hall PTR, 2002. — 711 p.
2. IEC 61000-3-12:2011. Electromagnetic compatibility. Part 3-2: Limits. Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current $>16A$ and $\leq 75A$ per phase.
3. Маруня Ю.В. Однофазний гібридний фільтр на вході випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням / Маруня Ю.В. // *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2020. Вип. 55. С. 11-15.
4. Губаревич В.Н. Однофазний широкополосний ЛМС-фільтр на вході випрямителя з ємкостною навантажкою / Губаревич В.М., Маруня Ю.В. // *Вісник НТУ "Харківський політехнічний інститут"*. 2015. Вип. 12 (1121). С. 398-401.

СТРУКТУРНА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Сучасна електроенергетична система України це складна кібернетична система з великої кількістю елементів, які утворюють системи з багатоконтурними зворотними зв'язками та має більш складні властивості в порівнянні зі складовими її елементами. Одним із головних елементів електроенергетичної системи є лінії електропередавання надвисокої напруги (ЛЕП НВН), які є системоутворюючими для магістральних електричних мереж. Від надійності та ефективності експлуатації ЛЕП НВН залежить нормальне функціонування об'єднаної електроенергетичної системи. Для забезпечення ефективної експлуатації ЛЕП НВН необхідно провести оптимізацію режиму напруги та реактивної потужності.

Оптимізація режимом роботи ЛЕП НВН, яка розглядається як локальний об'єкт, за рахунок мінімізації втрат активної потужності в ній, повинна ґрунтуватись на вирішенні задач оптимізації режиму напруги та реактивної потужності. Керування режимом роботи ЛЕП НВН полягає у правильному виборі складу пристроїв компенсації зарядної потужності з метою регулювання рівнів напруги та коефіцієнтів потужності на шинах кінцевих підстанцій. Слід зазначити, що оптимізація режимів роботи ЛЕП НВН в даній постановці задачі виконується, орієнтуючись на декотрі найбільш суттєві режимні параметри. Також слід зазначити, що в попередніх дослідженнях не розглядалися питання, які пов'язані з врахуванням коронування проводів та його впливу на розподіл напруги та доцільність застосування глибокого регулювання напруги в лініях даного класу напруги.

Мета роботи – провести оптимізацію характерних режимів роботи ЛЕП НВН сучасними засобами компенсації реактивної потужності.

Розробляючи обсяг електронної енергетичної системи, що охоплює великі території з поліпшеними потужними електричними станціями, освічує необхідність загального розгляду питань забезпечення статичної та динамічної стійкості їх паралельної роботи. Щодо забезпечення стабільної роботи в обсязі енергосистеми островів, що стоїть у багатьох країнах світу, про те, як свідчитимуть багаторазові системні аварії, забезпечуючи тривале порушення зв'язку електроенергії значущих чисел користувачів. Висока вартість лінійних електропередач дає змогу повною мірою використовувати їх пропускну здатність, забезпечуючи вирішення завдань забезпечення стійкості допоміжних силових пристроїв, забезпечуючи її завдання або допустимі показники. На сьогоднішній день запропоновано безліч шляхових рішень цієї проблеми, але з появою нової більш потужної техніки виникають нові вимоги до узго-

дження параметрів регулювання пристроїв та нові обмеження на режими роботи лінійних електропередач.

Одним із заходів, що забезпечує зниження втрат електроенергії, є оптимізації режимів роботи ЛЕП НВН по напрузі та реактивній потужності. В даній постановці проблеми ЛЕП НВН розглядається ізольовано для трьох найбільш розповсюджених режимів: мінімальний, максимальний та експлуатаційний робочий режим передавання потужності. Вирази для визначення втрат активної потужності в лінії електропередавання містять складові втрат холостого ходу та короткого замикання [1-3]. Останні, відповідно, прямо та обернено пропорційні квадрату напруги на шинах кінцевих підстанцій, що зумовлює можливість вибору оптимального рівня напруги, що забезпечує мінімум суми цих складових втрат.

Оптимальне значення напруги на початку або в кінці лінії електропередавання, зазвичай, практично не можуть бути досягнуті через неможливість підвищення робочої напруги гранично допустимого значення по умові роботи ізоляції обладнання та недостатній потужності та урегульованості парку встановлених компенсувальних пристроїв. Шляхом застосування сучасних пристроїв керованої компенсації зарядної потужності лінії електропередавання можна досягти більш глибокого регулювання реактивної потужності та напруги, та, відповідно, мінімізації втрат активної потужності:

Завантаження електричної мережі транзитної реактивної потужність призводить до збільшення токової завантаження всіх її складових (ліній електропередачі, трансформаторного обладнання), що, попереміж, призводить до недокористання сукупної пропускної здатності розглядається мережі за активною потужністю [1]. В ряду схемно-режимних ситуацій (ремонтні схеми, післяаварійні режими) підвищуються ризики:

обмеження проведених ремонтів електричного та генеруючого обладнання, що в більшості випадків представляється можливим дозволити організаційними заходами, наприклад, переносом строків проведення відповідних ремонтних робіт з заявлених (оптимальних для власника відповідного обладнання) на більш вигідні з точки зору сутності електричного режиму періоди року; • необхідність знаходження в роботі і додаткової завантаження за активною потужністю генеруючого обладнання в цілях забезпечення допустимих параметрів електричного режиму роботи розглядаємо мережі, що збільшує відповідні фінансові затрати власних генеруючих обладнання.

Оптимізація розподілу реактивної потужності в електричній мережі дозволяє збільшити використання пропускної здатності мережі та знизити об'єктивні ризики, в першу чергу, за рахунок зниження її токової завантажки [2].

Задача оптимізації розподілу реактивної потужності мережі вимагає комплексного підходу, її необхідно розглянути для енергосистеми в цілому, в

зобов'язальному порядку навчання вчителя наступних основних вимоги: перетоки в межсистемній мережі високого класу напрямки, у цілях виключення обмежень передачі потужності на транзитних зв'язках між ОЭС; допустимість змін напруження в основних вузлах енергосистеми з метою виключення зниження пределов статичної аперіодической стійкості межсистемних зв'язей [3]; наявність в енергосистемі енергорайонів дефіцитних за реактивною потужністю, у цілях забезпечення допустимих рівнів напруги по умови забезпечення статичної стійкості в вузлах навантаження; достатність іменних засобів компенсації реактивної потужності та регульованого Діапазон обладнання електростанцій у цілях забезпечення допустимих рівнів напруги по умовам роботи обладнання електричних станцій та підстанцій [4]; перераспределение перетоків реактивної потужності при виведенні в ремонт або аварійному відключення основних елементів розглядаємої мережі [5-9].

В свою чергу, напруга та реактивна потужність залежать від кількості та складу компенсувальних пристроїв зарядної потужності лінії. При регулюванні режиму роботи ЛЕП НВН необхідно виконати мінімізацію функції втрат потужності (1-2) по незалежним режимним параметрам

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial U} = 0, \frac{\partial \Delta P}{\partial B_{reac}} = 0 \quad (1)$$

дозволяє отримати умови оптимального регулювання потоків реактивної потужності лінії електропередавання, потужності КШР та напруги в точці підключення.

Напруга та реактивна потужність, що передається по лінії залежать від параметрів КШР:

$$Q = \frac{b_{K3}}{B^2} U_1^2 \quad U = D U_1^2 - \frac{B}{U_1^2} \left(P + \frac{b_{K3}}{B} U_1^2 \right) \quad (2)$$

Отримані результати в подальшому будуть використані при проведенні техніко-економічного порівняння результатів роботи керованих шунтувальних реакторів та статичних синхронних компенсаторів в лініях електропередавання надвисокої напруги для оптимізації нормальних режимів її роботи, а також для розроблення практичних рекомендацій щодо застосування зазначених технічних засобів при модернізації існуючих в Україні ЛЕП НВН та створенні перспективних гнучких ліній передавання надвисокої напруги в ОЕС України.

Зростання капітальних витрат при встановленні КШР, замість традиційних ШР, має бути компенсовано зменшенням втрат електроенергії при переході від природнього усталеного нормального режиму енергосистеми до економічного, який реалізується за допомогою КШР. В роботі показано, що при цьому отримуємо додаткове зменшення втрат у ЛЕП НВН за рахунок

більш точної компенсації зарядної потужності. Слід також відзначити, що КШР є багатофункціональним пристроєм і при відповідних налаштуваннях дає можливість коригувати не тільки усталені нормальні режими електричних мереж, а й їх аномальні режими та перехідні процеси. Більш детальному висвітленню цих питань будуть присвячені інші роботи авторів.

1. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Нетребський В. В., Тептя В. В. Принцип найменшої дії в електротехніці та електроенергетиці. Вінниця: ВНТУ, 2014. 212 с.
2. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Бурикін О.Б. Взаємовплив електричних мереж в процесі оптимального керування їх режимами. Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2008. 123 с.
3. Zhang X., Rehtanz C., Pal B. Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control. Springer, 2012. 546p., DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28241-6>
4. Kundul S., Ghosh T., Maitra K., Acharjee P., Thakur S. Optimal Location of SVC Considering Techno-Economic and Environmental Aspect. Proc. 2018 ICEPE 2nd International Conference on *Power, Energy and Environment*. Shillong, India, June 1-2, 2018. Pp. 15-19. doi: 10.1109/EPETSG.2018.8658729
5. Gu S., Dang J., Tian M. Compensation degree of controllable shunt reactor in EHV/UHV transmission line with series capacitor compensation considered. Proc. International Conference on *Mechatronics, Control and Electronic Engineering*. Shenyang, China, August 29-31, 2014, Pp. 65–68. DOI: <https://doi.org/10.2991/mce-14.2014.14>
6. Кузнецов В. Г., Тугай Ю. І. Кучанський В. В. (2012) Використання штучної нейронної мережі для визначення характеристик аномальних перенапруг. Праці Інституту електродинаміки НАН України, (31), 8–14.
7. Kuchansky V. (2016) Criteria of resonance overvoltages occurrence in abnormal conditions of extra high voltage transmission lines. Scientific works of Vinnitsa National Technical University. (4). 51–54.
8. Кучанський В. В., Лиховид Ю. Г., Мельничук В. А. (2015) Попередження резонансних перенапруг при несиметричних режимах ліній електропередач з поперечною компенсацією. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. (164). 42–43.
9. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В. (2012) Перенапруги в аномальних режимах ліній електропередачі надвисокої напруги. Технічна електродинаміка. (2). 40–41

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГІЛЬБЕРТА-ХУАНГА ДЛЯ ДЕКОМПОЗИЦІЇ ГРАФІКІВ СУМАРНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Вступ. Перехід до нового ринку електроенергії (ринку двосторонніх договорів та балансуючого ринку) [1, 2] вимагає уваги до задачі підвищення точності й стабільності результатів короткострокового прогнозування (КСП) сумарного електричного навантаження (СЕН) [3]. Її вирішення можливе шляхом побудови багатофакторної математичної моделі, в якій враховано структуру й характер електроспоживання зважаючи чинники впливу. Тому удосконалення методів КСП СЕН сприятиме позитивному економічному ефекту для електропостачальних компаній.

Мета дослідження. Вибір методу декомпозиції графіків сумарного електричного навантаження згідно факторів впливу на нього задля підвищення точності результатів короткострокового прогнозування (КСП) СЕН.

Оскільки на значення СЕН впливає декілька різнорідних чинників: внутрішні (технологічні) й зовнішні (метеорологічні, астрономічні тощо) для визначення міри впливу того чи іншого фактора доцільно проводити декомпозицію графіків годинних перерізів СЕН й прогнозувати кожен складову окремо залежно від фактора впливу на неї.

В даній моделі для декомпозиції графіків СЕН на температурну й базову складові застосовано метод Гільберта-Хуанга [4]. Цей метод є перспективним для дослідження нелінійних та нестационарних процесів. Класичний алгоритм методу Гільберта-Хуанга виглядає наступним чином:

1. Пошук в кривій СЕН годинного перерізу $y(x)$ локальних екстремумів, групування окремо локальних мінімумів та максимумів СЕН.

2. Побудова оригінальних кривих шляхом інтерполяції кривих локальних мінімумів $ub(xb)$ та максимумів $ut(xt)$. Оскільки кількість точок в оригінальних кривих може суттєво відрізнитися, тому необхідно інтерполювати (за допомогою кубічних сплайнів) та екстраполювати (за допомогою методу Брауна першого порядку) їх функції на всьому об'ємі вибірки $ub(x)$ та $ut(x)$ відповідно, де x змінюється від 1 до n – об'єм вибірки.

3. Тоді перша складова m знаходиться як середнє значення між функціями $ub(x)$ та $ut(x)$ (1):

$$m_i = \frac{ub_i + ut_i}{2} \quad (1)$$

4. Друга складова c_k (k – номер ітерації) є різницею між значеннями повного навантаження та першою складовою.

5. На наступних ітераціях $y(x)$ приймає значення m_{k-1} й алгоритм 1-4 продовжується доти, доки кількість локальних мінімумів або максимумів не буде меншою, ніж 2.

Так в роботі [5] описаний метод використано для попередньої обробки даних при однофакторному прогнозуванні із застосуванням нейронних мереж.

В розробленій моделі даний алгоритм адаптовано з метою відповідності результатів декомпозиції реальному процесові впливу зміни температури на СЕН. А саме виконано такі зміни:

1. Під час розрахунків використовується лише оригінальна крива по локальним мінімумам графіка СЕН, таким чином у більшості випадках базова та температурна складові мають додатні значення, крім того визначається межа «зони нечутливості», при температурах нижче якої температурна складова рівня нулю.

2. Після кожної ітерації виділені складові c_k додаються й розраховується коефіцієнт кореляції між сумою виділених складових $\sum c_k$ та температурою повітря, він є додатковою умовою для зупинки циклу декомпозиції.

Дослідження проведено за даними Київенерго за зимовий період з 01.11.2015 по 31.03.2016 та за літній період з 01.06.2015 по 31.08.2015. На Рис. 1 зображено графіки температурної складової й температури повітря для 12 годинного перерізу обох вибірок, де чітко спостерігається обернений (для зимового) й прямий (для літнього періоду) кореляційний зв'язок.

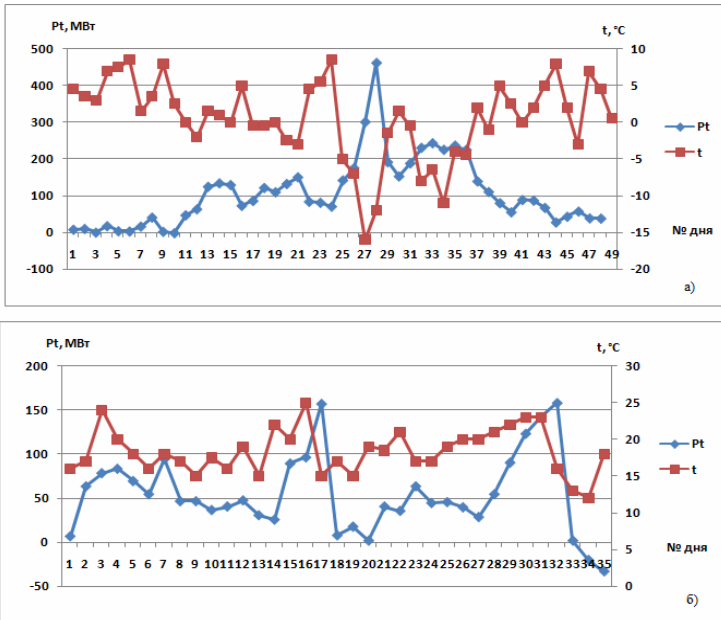


Рис 1. – Графіки температурної складової й температури повітря для зимового (а) й літнього (б) періодів.

Висновки. Після проведення декомпозиції графіків СЕН (окремо для кожного зрізу) за допомогою методу Гільберта-Хуанга із внесеними змінами, отримано температурну складову, що має тісний кореляційний зв'язок із температурою повітря, що сприяє побудові більш точної регресійної залежності для її прогнозування. Подальше використання запропонованого алгоритму дозволить забезпечити підвищення точності результатів КСП СЕН.

1. Ivanov H., Blinov I., Parus Y. Simulation Model of New Electricity Market in Ukraine // IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems. 2019. DOI: [10.1109/ESS.2019.8764184](https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764184)
2. Блінов І.В., Мірошник В.О., Шиманюк П.В. Короткостроковий інтервальний прогноз сумарного відпуску електроенергії виробниками з відновлювальних джерел енергії. Праці Інституту електродинаміки НАН України 2019. Вип. 54: С. 5-12.
3. Черненко П., Сичова В. 2021. Удосконалення алгоритму визначення впливу температури повітря на сумарне електричне навантаження енергосистеми для підвищення точності короткострокового прогнозування//Технічна електродинаміка. 2021. №2, С. 77-83.
4. Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C. C., and Liu H. H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. // Proc. R. Soc. Lond. A. — 1998. — Т. 454. — С. 903—995.
5. В. Г. Курбацкий, Д. Н. Сидоров, В. А. Спириев, Н. В. Томин, О нейросетевом подходе к прогнозированию нестационарных временных рядов на основе преобразования Гильберта–Хуанга, Автомат. и телемех., 2011, выпуск 7, 58–68

ОНОФАКТОРНЕ КОРОТКОСТРОКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ СУМАРНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ТРЬОХ ІЄРАРХІЧНИХ РІВНЯХ ОЕС УКРАЇНИ

Відомо, що для вирішення технологічних задач планування режимів енергосистем заздалегідь проводиться короткострокове прогнозування (КСП) сумарного електричного навантаження (СЕН) з горизонтом прогнозування від 1 до 7 діб. Сьогодні актуальність задач прогнозування СЕН підсилюється сучасними умовами функціонування ринку електричної енергії, де точність прогнозів обумовлює рівень небалансів електричної енергії, що створюються різними учасниками ринку [1, 2].

Задача КСП об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України розв'язується на кожному з трьох ієрархічних рівнях незалежно. Переваги багаторівневого вирішення цієї задачі вперше в вітчизняній практиці було наведено в роботі [3]. В роботі [4] сучасні методи ієрархічного прогнозування поділяються на дві групи: з низу вгору та з гори вниз. Перший підхід об'єднує прогнози з нижніх рівнів для прогнозу на кожен вищий рівень, а другий використовує тільки історичні дані з усіх рівнів для прогнозу. Зроблено висновок, що для підвищення точності прогнозування на верхньому рівні ієрархічної системи треба покращити точність прогнозування на нижніх рівнях. Відмічається, що крім географічних та зональних ієрархій важливим фактором ще є ієрархія метеорологічних факторів, які складно виявити для кожної ієрархічної зони.

На основі виконаних досліджень запропоновано трирівневе КСП-проводити за наступним алгоритмом. На нижньому рівні – обласних енергосистем враховується вплив на СЕН технологічних (режими роботи енергоємних підприємств), метеорологічних (температура повітря, хмарність, швидкість та напрямок вітру), астрономічних (час сходу та заходу сонця, світлова тривалість дня), календарних (робочі, вихідні, святкові та інші не регулярні дні). На другому рівні регіональних енергосистем враховуються втрати електроенергії ЛЕП 110 та 150 кВ і окремо втрати в ЛЕП 330 кВ та 750 кВ. На верхньому рівні ОЕС України здійснюється синтез прогнозів другого рівня тому що додаткові фактори які треба враховувати – відсутні.

З метою підвищення якості прогнозування СЕН запропоновано на кожному ієрархічному рівні розробити окремі незалежні моделі. Результати яких в подальшому використовувати для ієрархічного прогнозування та порівняння точності моделей. В даній роботі наведені результати однофакторних прогнозів на кожному з трьох ієрархічних рівнів ОЕС України. За допомогою розробленого апарату штучного інтелекту у вигляді нейронної мережі глибинного навчання типу LSTM.

LSTM-модуль - це рекурентний модуль мережі, здатний запам'ятовувати значення як на короткому так і на довгому проміжках часу, що допомагає краще обробляти часові ряди. Кожен модуль мережі передає частину інформації в інший модуль. Таким чином ми можемо запам'ятовувати та використовувати деяку послідовність в наступних модулях.

Задля досягнення результату побудовано математичну модель для кожного рівня прогнозування, а саме: рівня оператора системи розподілу, де використані дані ПАТ Київенерго; рівня регіональної енергосистеми оператора системи передачі на прикладі Центральної електроенергетичної системи НЕК УКРЕНЕРГО; рівня ОЕС України.

В табл.1. представлені результати показника RMSE для відповідних тестових вибірок. Тренування проводилось на даних з січня 2015р. по серпень 2016р., тестову вибірку було розділено на 2-і групи: літню (остання неділя серпня) та зимню (остання неділя грудня).

Таблиця 1.

Похибки на тестових даних RMSE на кожному рівні

Енергосистеми	Літній період, МВт	Літній період, %	Зимній період, МВт	Зимній період, %
Рівень системи розподілу	57.58	5.9%	60.52	4.5%
Рівень регіональної енергосистеми	98.3	3.8%	75.1	2%
ОЕС України	395	2.6%	308.65	1.5%

За результатами прогнозування видно, що з кожним вищим ієрархічним рівнем точність прогнозування збільшується. Для покращення точності на нижніх рівнях допоможе врахування зовнішніх факторів, які безпосередньо впливають на них. Врахування більш точних прогнозів на нижніх рівнях допоможуть покращити точність на верхніх шляхом використання ієрархічного підходу.

1. Ivanov H., Blinov I., Parus Ye. Simulation Model of New Electricity Market in Ukraine// 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). 2019. P. 339-342. DOI: [10.1109/ESS.2019.8764184](https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764184)
2. Блінов І.В., Мірошник В.О., Шиманюк П.В. Короткостроковий інтервальний прогноз сумарного відпуску електроенергії виробниками з відновлювальних джерел енергії. Праці Інституту електродинаміки НАН України 2019. Вип. 54: С. 5-12.
3. Черненко П.О. багаторівневе взаємозалежне прогнозування електричних навантажень енергооб'єднання / П.А. Черненко // проф. ІЕД НАНУ. Енергоефективність – 2000. Ст. 99-104.
4. Seyedeh Narjes Fallah; Mehdi Ganjkhani; Shahaboddin Shamshirband. Computational Intelligence on Short-Term Load Forecasting: A Methodological Overview. MDPI 2019.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] M. Migliori, S. Lauria. Renewable sources integration using HVDC in parallel to AC traditional system: the Adriatic project. 2019 AEIT HVDC International Conference (AEIT HVDC). Florence, Italy, 9-10.05.2019. DOI: [10.1109/AEIT-HVDC.2019.8740556](https://doi.org/10.1109/AEIT-HVDC.2019.8740556)
- [2] Yan Li, Yongning Chi, Zhibing Wang, Haiyan Tang, Guanglei Li, Shuming Sun, Yan Cheng. Study on Fault Control Requirement and Strategy of Large Scale Renewable Energy VSC-HVDC Integration. Conference. 8-10.11.2019. DOI: [10.1109/EI247390.2019.9062065](https://doi.org/10.1109/EI247390.2019.9062065)
- [3] Встановлена потужність енергосистеми України на 12/2020. URL: <https://ua.energy/vstanovlena-potuzhnist-energosityemy-ukrayiny/> (дата звернення 25.01.2021)
- [4] В.В. Павловський, А.В. Приходько. Системи передачі електричної енергії постійним струмом. Динамічна модель перетворювача з лінійною комутацією. Праці інституту електродинаміки НАН України. 2020. Вип. 55. С. 16-21.
- [5] Guo-Jie Li, Lie T.T., Yuan-Zhang Sun, Si-Ye Ruan, Ling Peng, Xiong Li. Applications of VSC-Based HVDC in Power System Stability Enhancement. 2005 International Power Engineering Conference. Singapore, 29.11.-2.12. 2005. DOI: [10.1109/IPEC.2005.206937](https://doi.org/10.1109/IPEC.2005.206937)
- [6] План розвитку системи передачі на 2021-2030 роки. НЕК Укренерго. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2021/01/Plan-rozvytku-systemy-peredachi-na-2021-2030-roky-shvalenyi-postanovoyu-NKREKP-57-vid-20.01.2021.pdf> (дата звернення 01.02.2021)
- [7] H. Liao and J. V. Milanović (2016) On capability of different FACTS devices to mitigate a range of power quality phenomenon. IET Generation, Transmission & Distribution 11(5): 1202-1211.
- [8] V. Kuchansky, D. Malakhatka, I. Blinov (2020) Application of Reactive Power Compensation Devices for Increasing Efficiency of Bulk Electrical Power Systems. In: 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems, Kyiv, Ukraine, 2020, pp 83-86.
- [9] V. Kuchansky (2017) The prevention measure of resonance overvoltages in extra high voltage transmission lines. In: 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kyiv, 2017, pp 436-441.

- [10] Інтелектуальні енергосистеми: елементи та режими: Під загальною редакцією акад. НАН України О.В. Кириленко / Інститут електродинаміки НАН України. - 2016 - С. 400.
- [11] V. Kuchanskyu and I. O. Zaitsev (2020) Corona Discharge Power Losses Measurement Systems in Extra High Voltage Transmissions Lines. In:2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp 48-53.
- [12] Kuznetsov, Y. Tugay and V. Kuchanskyu (2017) Influence of corona discharge on the internal overvoltages in highway electrical networks. Technical electrodynamics 2017 (4), pp. 55-60.
- [13] Про ринок електричної енергії. Верховна Рада України; Закон від 13.04.2017 № 2019-VIII. <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>.
- [14] Кириленко О.В., Басок Б.І., Базєєв Є.Т., Блінов І.В. Енергетика України та реалії глобального потепління// Технічна електродинаміка. 2020. № 3. С 52-61.
- [15] Ivanov H., Blinov I., Parus Y. Simulation Model of New Electricity Market in Ukraine // IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems. 2019.
- [16] Про альтернативні джерела енергії. Верховна Рада України; Закон № 555-15. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15>.
- [17] Блінов І.В., Мірошник В.О., Шиманюк П.В. Короткостроковий інтервальний прогноз сумарного відпуску електроенергії виробниками з відновлювальних джерел енергії. Праці Інституту електродинаміки НАН України 2019. Вип. 54: С. 5-12.
- [18] Іванов Г.А., Блінов І.В., Парус Є.В., Мірошник В.О., Складові моделі для аналізу впливу відновлюваних джерел енергії на ринкову вартість електроенергії в Україні// Технічна електродинаміка. 2020. № 4. с. 72-75
- [19] Блінов І.В., Парус Є.В, Іванов Г.А. Імітаційне моделювання функціонування балансуючого ринку електроенергії з урахування системних обмежень на параметри ОЕС України // Технічна електродинаміка. 2017. № 6. С. 72 – 79.
- [20] Blinov I., Parus E. Approach of reactive power pricing for ancillary service of voltage control in Ukraine// IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems. 2014. Pp. 145-148.
- [21] Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В. Оцінка роботи електростанцій при наданні допоміжних послуг з первинного та вторин-

- ного регулювання частоти в ОЕС України. Технічна електродинаміка. 2013. № 5. С. 55 – 60.
- [22] Димакова Н.А., Шарапов Р.В. Проблема загрязнения подземных вод, Современные наукоемкие технологии, № 2. С. 79-82, 2013.
- [23] Patrick Vanraes, Anton Y. Nikiforov and Christophe Leys. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. 2016. Chapter 15. Pp. 429–478. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/61830>.
- [24] W.F.L.M. Hoeben, E.M. van Veldhuizen, W.R. Rutgers, C.A.M.G. Cramers, G.M.W. Kroesen, The degradation of aqueous phenol solutions by pulsed positive corona discharges, Plasma Sour. Sci. Technol. 9 (2000) 361–369.
- [25] B. Jiang, J. Zheng, S. Qiu, M. Wu, Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation, Chem. Eng. J. 236 (2014) 348–368.
- [26] Божко І.В., Кондратенко І.П., Ефективність обробки водного розчину метилено-вої сині імпульсним бар'єрним розрядом на його поверхню, Технічна електродинаміка, №6, С. 89-97, 2018.
- [27] M. A. Malik, Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient?, Plasma Chemistry and Plasma Processing, vol. 30, pp. 21–31, 2010.
- [28] B.R. Locke, M. Sato, P. Sunka, M.R. Hoffmann, J.S. Chang, Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment, Ind. Eng. Chem. Res. 45 (2005) 882–905.
- [29] Кондратенко І.П., Божко І.В., Берека В.О., Визначення параметрів краплинно-плівкового стану модельної рідини, Інтернет-конференція Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування. Київ, Україна, 20-24 травня 2019.
- [30] T. Sugai, W. Liu, A. Tokuchi, W. Jiang, and Y. Minamitani, “Influence of a circuit parameter for plasma water treatment by an inductive energy storage circuit using semiconductor opening switch”, IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 41, No. 4, pp. 967-974, 2013.
- [31] T. Sugai, A. Tokuchi, W. Jiang, and Y. Minamitani, “Investigation for optimization of an inductive energy storage circuit for electrical discharge water treatment”, IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 42, No. 10, pp. 3101-3108, 2014.

- [32] T. Sugai, W. Jiang, A. Tokuchi, "Influence of Forward Pumping Current on Current Interruption by Semiconductor Opening Switch", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 22, No. 4, pp. 1971-1975, 2015.
- [33] Grabowski L.R., Veldhuizen E.M., Pemen A.J.M., Rutgers W.R. Breakdown of methylene blue and methyl orange by pulsed corona discharge, *Plasma Sources Sci. Tech-nol.*, №16, Pp. 226-232, 2007.
- [34] Зайцев Є.О., Панчик М.В. Фізичні процеси та їх вплив на розвиток дефектів в осерді статора потужних генераторів. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2020. Issue: 224. P. 81–84. (Index in Copernicus, Google Scholar) DOI:10.31174/SEND-NT2020-224VIII27-20.
- [35] Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Capacitive distance sensor with coplanar electrodes for large turbogenerator core clamping system. *Proceedings of the 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, April 16 – 18, 2019, Kiev, Ukraine. P.644-647.
- [36] Левицкий А.С, Зайцев Е.А., Панчик М.В. Контроль сердечника статора турбогенератора при сборке. «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов»: Сборник тезисов 7-й международной научно-технической конференции, 24-25 сентября 2020 года, г. Могилев, Республика Беларусь. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. С. 99-105. URI: <http://e.biblio.bru.by/handle/1212121212/12991>
- [37] Левицкий А.С., Зайцев Е.А., Кобзарь К.А. Измерение хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах сердечника статора турбогенератора с помощью емкостного сенсора//Приборы и методы измерений. – 2018 – Т.9(2) –С. 121-129. DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129.
- [38] H. R. Tomlinson, «Interlaminar insulation test for synchronous machine stators», *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 71, issue: 1, January 1952, pp. 676-677.
- [39] J. P. Harbord, «Some tests on modern high-speed turbo alternators», *IEE Students' Quarterly Journal*, vol. 24, issue: 93, September 1953, pp. 3-9.
- [40] J. W. Shelton and B. M. Reichman, «A comparative analysis of turbo-generator core inspection techniques», in *Proceedings of the American Power Conference, Chicago, USA, 22-24 April 1985*, pp. 643-650.

- [41] Lodge, «Flux testing of generator stator cores», CEGB, SSD/NE/R293, 1975.
- [42] IEEE Std 56-1977, «Guide for insulation maintenance of large alternating-current rotating machinery (10 000 kVA and Larger)», IEEE, USA, 1977 (reaffirmed 1991).
- [43] IEEE Std 62.2-2004, «Guide for diagnostic field testing of electric power apparatus», IEEE, USA, 2005.
- [44] СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 «Норми випробування електрообладнання», ПАТ «Укренерго» Україна, 2007.
- [45] С. Maughan, 'Testing of turbine-generator stator core lamination insulation', in EPRI 2004 Winter Workshop and Turbine & Generator Users Group (TGUG) Meeting, Albuquerque, USA, January 2004, p. 6.
- [46] IEEE Std 1129-2014, 'IEEE Guide for online monitoring of large synchronous generators (10 MVA and above)', IEEE, USA, 2014
- [47] Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Novik A.I., Berezhnychenko V.O. & Smyrnova A.M. Research of a capacitive distance sensor to grounded surface. *Telecommunications and Radio Engineering*, 78(2):5-18 (2019) P.173-180. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80
- [48] Gorbova Galina M. Analysis capacitance and linearity gauge characteristic of coplanar micro-displacement sensor / Galina M. Gorbova, Mikhail M. Gorbov, Gerard C.M. Meijer // Proceeding XVII IMECO World Congress, June 22–27, 2003, Dubrovnic, Croatia. TC15. P. 1965–1968
- [49] Березниченко В.О., Зайцев Є.О. Безконтактний ємнісний сенсор системи контролю параметрів биття валів потужних електричних машин. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. Вип. 57. С. 81–88. DOI: 10.15407/publishing2020.57.081.
- [50] Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій / Зозулін Ю.В., Антонов О.Є., Бичік В.М. та ін. Харків: ПФ «Колегіум», 2011. 228 с.
- [51] Зайцев Є.О., Левицький А.С., Панчик М.В. Особливості процесу пресування осердя статора потужного турбогенератора. Електро-механічні та енергетичні системи. *Методи моделювання та оптимізації: Збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів*, 11-12 квітня 2019 м. Кременчук, Україна, 2019. С.81-83.

- [52] Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Capacitive distance sensor with coplanar electrodes for large turbogenerator core clamping system. *Proceedings of the 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, April 16 – 18, 2019, Kiev, Ukraine. P.644-647. (IEEE Xplore, Index in SCOPUS)
- [53] Jackson R.J., Renew D.C., Brown M. L. The use of shaft voltage measurements to monitor turbogenerator stator cores. *CERL. RD/L/N 32/80*. 1980.
- [54] Національна енергетична компанія Укренерго URL: <https://ua.energy/yevrointegratsiya/integratsiya-do-entso-e/#1593010393373-8120ccb2-c9d4> (дата звернення: 05.01.2021).
- [55] Левицький А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів: монографія. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. 242 с.
- [56] Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Novik A.I., Bereznichenko V.O. & Smyrnova A.M. Research of a capacitive distance sensor to grounded surface. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. No 78 Vol. 2. Pp.173-180. DOI: [10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80](https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80)
- [57] Gorbova G. M., Gorbov M. M., Meijer G.C.M. Analysis capacitance and linearity gauge characteristic of coplanar micro-displacement sensor. *Proceeding XVII IMECO World Congress Metrology in the third millennium*. Dubrovnic, Croatia, 22–27 June 2003. TC15. Pз. 1965-1968.
- [58] Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кромпляс Б.А. Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору в гідрогенераторі SGK 538/160-70М. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. № 43. С.134–136.
- [59] Карандеев К.Б. Специальные методы электрических измерений: навч. посіб. М.: Госэнергоиздат, 1963. 344 с.
- [60] Макаров И.М., Менский Б. М. Линейные автоматические системы: монографія. М.: Машиностроение, 1982. 504 с.
- [61] Березниченко В.О., Зайцев Є.О. Безконтактний ємнісний сенсор системи контролю параметрів биття валів потужних електричних машин. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. №. 57. С. 81–88. DOI: [10.15407/publishing2020.57.081](https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.081).
- [62] AD7745/46 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor. 2019. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical->

documentation/data-sheets/AD7745_7746.pdf (дата звернення: 20.12.2020).

- [63] Akinin K.P., Antonov A.E., Kireyev V.G., Filomenko A.A. Return-rotary motion control system of rotor of brushless magnetoelectric motor. Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. 2020. № 55. С. 67–71.
- [64] Ивей К.А. Системы автоматического управления на несущей частоте переменного тока. Москва: Машиностроение, 1968. 320 с.
- [65] Акинин К.П., Киреев В.Г., Филоменко А.А., Лавриненко В.А., Ми-хайлик Е.М. Исследование электромеханических характеристик бесконтакт-ных магнитоэлектрических двигателей возвратно-вращательного движения. Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. 2019. Вип. 54. С. 47–51.
- [66] Антонов А.Е., Петухов И.С., Филоменко А.А. Магнитоэлектрический двигатель возвратно-вращательного движения с упругой связью ротора. Технічна електродинаміка. 2013. №1. С. 49–55.
- [67] Ester M., Kriegel H.P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). AAAI Press, 1996, pp. 226–231.
- [68] Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z. Isolation Forest. 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining, Pisa, Italy, 2008, pp. 413–422, doi: 10.1109/ICDM.2008.17.
- [69] Breunig M.M., Kriegel H.P., Ng R.T., Sander J. LOF: identifying density-based local outliers. ACM Sigmod Record 29, 2000, pp. 93–104. 10.1145/342009.335388.
- [70] B. K. Bose. Modern Power Electronics and AC Drives / B. K. Bose. — Prentice Hall PTR, 2002. — 711 p.
- [71] IEC 61000-3-12:2011. Electromagnetic compatibility. Part 3-2: Limits. Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current $>16A$ and $\leq 75A$ per phase.
- [72] Маруня Ю.В. Однофазний гібридний фільтр на вході випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням / Маруня Ю.В. // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. 2020. Вип. 55. С. 11–15.
- [73] Губаревич В.Н. Однофазный широкополосный ЛМС-фильтр на входе выпрямителя с емкостной нагрузкой / Губаревич В.М.,

- Маруня Ю.В. // Вісник НТУ "Харківський політехнічний інститут". 2015. Вип. 12 (1121). С. 398-401.
- [74] Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Нетребський В. В., Тептя В. В. Принцип найменшої дії в електротехніці та електроенергетиці. Вінниця: ВНТУ, 2014. 212 с.
- [75] Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Бурикін О.Б. Взаємовплив електричних мереж в процесі оптимального керування їх режимами. Вінниця: УНІВЕР-СУМ, 2008. 123 с.
- [76] Zhang X., Rehtanz C., Pal B. Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control. Springer, 2012. 546p., DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28241-6>
- [77] Kundul S., Ghosh T., Maitra K., Acharjee P., Thakur S. Optimal Location of SVC Considering Techno-Economic and Environmental Aspect. Proc. 2018 ICEPE 2nd International Conference on Power, Energy and Environment. Shillong, India, June 1-2, 2018. Pp. 15-19. doi: 10.1109/EPETSG.2018.8658729
- [78] Gu S., Dang J., Tian M. Compensation degree of controllable shunt reactor in EHV/UHV transmission line with series capacitor compensation considered. Proc. International Conference on Mechatronics, Control and Electronic Engineering. Shenyang, China, August 29-31, 2014, Pp. 65–68. DOI: <https://doi.org/10.2991/mce-14.2014.14>
- [79] Кузнецов В. Г., Тугай Ю. І. Кучанський В. В. (2012) Використання штучної нейронної мережі для визначення характеристик аномальних пере-напруг. Праці Інституту електродинаміки НАН України, (31), 8–14.
- [80] Kuchansky V. (2016) Criteria of resonance overvoltages occurrence in abnormal conditions of extra high voltage transmission lines. Scientific works of Vinnitsa National Technical University. (4). 51–54.
- [81] Кучанський В. В., Лиховид Ю. Г., Мельничук В. А. (2015) Попередження резонансних перенапруг при несиметричних режимах ліній електро-передач з поперечною компенсацією. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. (164). 42–43.
- [82] Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В. (2012) Перенапруги в аномальних режимах ліній електропередачі надвисокої напруги. Технічна електродинаміка. (2). 40–41

- [83] Ivanov H., Blinov I., Parus Y. Simulation Model of New Electricity Market in Ukraine // IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems. 2019. DOI: [10.1109/ESS.2019.8764184](https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764184)
- [84] Блінов І.В., Мірошник В.О., Шиманюк П.В. Короткостроковий інтервальний прогноз сумарного відпуску електроенергії виробниками з відновлювальних джерел енергії. Праці Інституту електродинаміки НАН України 2019. Вип. 54: С. 5-12.
- [85] Черненко П., Сичова В. 2021. Удосконалення алгоритму визначення впливу температури повітря на сумарне електричне навантаження енергосистеми для підвищення точності короткострокового прогнозування//Технічна електродинаміка. 2021. №2, С. 77-83.
- [86] Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C. C., and Liu H. H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. // Proc. R. Soc. Lond. A. — 1998. — Т. 454. — С. 903—995.
- [87] В. Г. Курбацкий, Д. Н. Сидоров, В. А. Спиряев, Н. В. Томин, О нейросетевом подходе к прогнозированию нестационарных временных рядов на основе преобразования Гильберта–Хуанга, Автомат. и телемех., 2011, выпуск 7, 58–68
- [88] Ivanov H., Blinov I., Parus Ye. Simulation Model of New Electricity Market in Ukraine// 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). 2019. P. 339-342. DOI: [10.1109/ESS.2019.8764184](https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764184)
- [89] Блінов І.В., Мірошник В.О., Шиманюк П.В. Короткостроковий інтервальний прогноз сумарного відпуску електроенергії виробниками з відновлювальних джерел енергії. Праці Інституту електродинаміки НАН України 2019. Вип. 54: С. 5-12.
- [90] Черненко П.О. багаторівневе взаємозалежне прогнозування електричних навантажень енергооб'єднання / П.А. Черненко // проф. ІЕД НАНУ. Енергоефективність – 2000. Ст. 99-104.
- [91] Seyedeh Narjes Fallah; Mehdi Ganjkhani; Shahaboddin Shams-?irband. Computational Intelligence on Short-Term Load Forecasting: A Methodological Overview. MDPI 2019.