

УДК 519.8:621.313

DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2025.02.057>**МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЇЇ РЕЗИЛЬЄНТНОСТІ В УМОВАХ СИСТЕМАТИЧНИХ ТЕРОРИСТИЧНИХ АТАК**С.Є. Саух¹, чл.-кор.НАН України, А.В. Борисенко², докт.техн.наук,¹ Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України,

вул. Генерала Наумова, 15, Київ, 03164, Україна,

e-mail: ssaukh@gmail.com² НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,

пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна,

e-mail: andborys@ukr.net

Проаналізовано руйнівний вплив періодичних масованих ракетно-дронових атак на електроенергетичну систему України. Наслідки атак представлено характеристиками руйнувань типових енергетичних об'єктів. Кожна така характеристика відображає розподіл кількості зруйнованих об'єктів за масштабом їх руйнування – малий, середній та великий. Ремонтні роботи на зруйнованих об'єктах певного типу представлено залежністю тривалості їх виконання від масштабу руйнування. Введені характеристики руйнувань енергетичних об'єктів та тривалості робіт з їх ремонту дають змогу записати рівняння динаміки множин генеруючих енергоблоків різного типу, доступних для використання на поточний період часу. До зруйнованих енергоблоків АЕС, ТЕС, ГЕС, пошкоджених систем зберігання енергії таких типових для електроенергетичної системи України як ГАЕС, а також пошкоджених генеруючих установок, що використовують відновлювані джерела енергії, відносяться як ті, що були уражені безпосередньо, так і ті, що втратили можливість підключення до енергосистеми через руйнування трансформаторних підстанцій та/або інших критично важливих мережесевих об'єктів. Задля дослідження резильєнтності електроенергетичної системи України до масованих ракетно-дронових атак запропоновано кластерну математичну модель режимів навантаження такої системи у складі типових енергетичних об'єктів, доповнену рівняннями динаміки підмножин цих об'єктів, доступних для використання в поточний період часу. Така модель забезпечує вирішення задач прогнозування стану готовності електроенергетичної системи України до виконання свого основного функціонального призначення – задоволення попиту на електроенергію. Сформульовано задачі дослідження резильєнтності електроенергетичної системи України до систематичних масштабних ракетно-дронових атак. Бібл. 32, рис. 8, табл. 3.

Ключові слова: електроенергетична система, резильєнтність, модель, ракетно-дронові атаки.

Вступ. Зазвичай під стійкістю електроенергетичної системи (ЕЕС) розуміють її спроможність адаптуватися до різного роду внутрішніх і зовнішніх збурень, повертатися до усталеного режиму функціонування, не втрачаючи при цьому синхронний режим роботи.

Здійснюючи поточне управління режимами навантаження ЕЕС, її оператор залучає наявні резерви енергетичного обладнання задля підтримки усталеного режиму функціонування системи та задоволення потреб споживачів електроенергії. Через обмеженість резервів у своєму розпорядженні оператор не може забезпечувати усталений режим функціонування ЕЕС в умовах виникнення масштабних аварій. За таких обставин застосовуються особливі механізми управління та спеціальні ресурси для відновлення функціональності ЕЕС: залучаються штатні та додаткові ремонтні підрозділи та резервне обладнання для виконання відновлюваних робіт, тимчасово застосовуються механізми розвантаження споживачів.

Отже, стійкість ЕЕС підтримується шляхом управління її резервними механізмами та ресурсами, які використовуються для відповідного впливу на структурну організацію системи та процеси, що в ній відбуваються. На рис. 1 показано основні складові електроенергетичної системи. За умов недостатності резервних механізмів і ресурсів для управління структурою і процесами в ЕЕС поступово або повністю втрачається її здатність до відновлення властивих їй функцій, тобто така

© Саух С.Є., Борисенко А.В., 2025

ORCID: ¹ <https://orcid.org/0000-0001-7658-0839>, ² <https://orcid.org/0000-0003-2377-8475>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

система поступово деградує до стану колапсу [1]. Отже, стає зрозумілою важлива роль управління резервними механізмами та ресурсами. Обмежена дія резервних механізмів і недостатній обсяг резервних ресурсів, а також суттєві затримки у їх залученні задля локалізації та усунення негативних зовнішніх і внутрішніх впливів на ЕЕС призводять до часткової або повної втрати її функціональних властивостей.

Достатність резервних механізмів і ресурсів для швидкого відновлення функціональних властивостей ЕЕС свідчить про її резильєнтність. Зазначимо, що важливою характеристикою резильєнтності є тривалість процесів відновлення. Якщо тривалість таких процесів більша періодичності негативних впливів на систему, які порушують її функціональні властивості, то така система втрачає свою резильєнтність. Задля ілюстрації на рис. 2 та 3 наведено графіки готовності ЕЕС до виконання своїх функцій у мирний та воєнний час відповідно. Впроваджені у мирний час резервні механізми і ресурси виявляються недостатніми для підтримки готовності ЕЕС до виконання своїх функцій в умовах воєнної загрози. За умов, коли періоди ракетно-дронових атак менші тривалості процесів адаптації та відновлення ЕЕС, система втрачає свою резильєнтність.

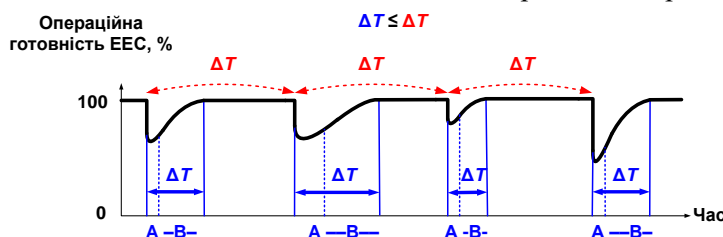
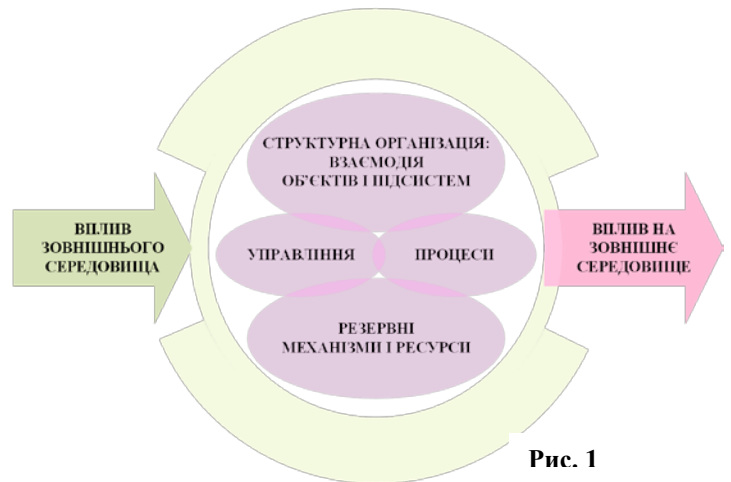


Рис. 2. Наявні в ЕЕС резервні механізми і ресурси достатні для швидкого реагування на негативні зовнішні чи внутрішні деструктивні впливи. Тривалість процесів (А) адаптації та (В) відновлення системи

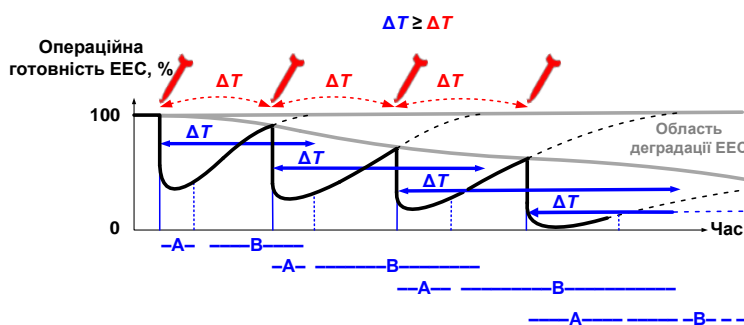


Рис. 3. Наявні в ЕЕС резервні механізми і ресурси недостатні для швидкого реагування на руйнівні наслідки ракетно-дронових атак. Тривалість процесів (А) адаптації та (В) відновлення системи

дослідників, які періодично оприлюднюють аналітичні звіти з оцінками поточного стану енергосистеми [13, 14-22]. Такі дослідження не дають можливості сформулювати уявлення про перспективи функціонування ОЕС України та оцінити її резильєнтність на майбутніх періодах тривалістю рік та більше.

Вагомим чинником підвищення резильєнтності ОЕС України став перехід на паралельну роботу з ENTSO-E [23]. Це дало змогу залучати аварійну допомогу від сусідніх енергосистем для подолання кризових ситуацій та здійснювати імпорт електроенергії.

Забезпечення надійного та безпечного постачання електроенергії має важливе значення для економічного зростання та розвитку країни. Для розробників енергетичної політики надзвичайно важливою є проблема забезпечення резильєнтності ЕЕС.

Комплексне планування сталого розвитку енергетичного сектору передбачає визначення майбутніх загроз і критичних режимів навантаження ЕЕС, а також можливостей підготовки та адаптації до них. Планування сталого розвитку електроенергетики передбачає розробку стратегії пом'якшення наслідків реалізації таких загроз, тобто стратегії забезпечення резильєнтності ЕЕС [2, 3, 4, 5]. Під час планування розвитку ЕЕС враховуються різноманітні фактори негативного впливу на її функціонування, зазвичай властиві лише умовам мирного часу, такі як техногенні аварії, стихійні лиха, антропогенний вплив та інші [1, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Майже трирічне функціонування Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України в умовах російських масованих ракетно-дронових атак є предметом постійної уваги

Мета представленою дослідження полягає у розробці кластерної математичної моделі ЕЕС, придатної для короткострокового прогнозування її розвитку в умовах систематичних масованих ракетно-дронових атак. Модель призначена для оцінювання резильєнтності вітчизняної ЕЕС за різних сценарних умов її захисту, руйнування та відновлення з урахуванням наявних резервних механізмів та ресурсів.

Наслідки російських ракетно-дронових ударів по енергетичній інфраструктурі України.

Одним з основних елементів стратегії російської агресії проти України стали спроби перешкодити роботі ОЕС України, спричинити таким чином зупинку промисловості та підірвати готовність народу України до спротиву. У табл. 1 в хронологічній послідовності наведено стислий опис наслідків російських систематичних масштабних ракетно-дронових ударів по ОЕС України впродовж 2024 року із зазначенням основних уражених об'єктів та наслідків їх руйнування для системи.

Таблиця 1

Стан ОЕС України напередодні масованих атак [14,15]	Наприкінці лютого у виробництві електроенергії використовувалися: - 9 блоків АЕС; - 21 одиниця обладнання ТЕС та ТЕЦ перебувала у резерві; - потужності ГЕС - 1,7 ГВт, що перевищило прогнозу величину 1,1 ГВт через паводок; - потужності СЕС та ВЕС зросли до 0,6 ГВт. Перед атаками, наприкінці березня: - у резерві знаходилося до 20 одиниць обладнання ТЕС та ТЕЦ; - комерційний експорт вночі 4 березня досяг максимуму – 726 МВт; - потужність імпорту у пікові години досягала максимумів в межах 0,1-1,0 ГВт; - обсяги експорту перевищували обсяги імпорту електроенергії.
Дата атаки	22-31 березня
Пошкодження [15]	Виведені з ладу Харківська ТЕЦ-5 і Зміївська ТЕС, серйозно пошкоджені Дніпровська ГЕС, Бурштинська та Ладизинська ТЕС, а також близько 20 підстанцій. Втрачено 5 ГВт установленої потужності (4 ГВт – теплової, 1 ГВт – ГЕС). Залучалася аварійна допомога з-за кордону потужністю до 1,5 ГВт (26-27 березня) До атаки генеруюча потужність складала 13,7 ГВт, після – 11,5-13,7 ГВт.
Стан ОЕС України на кінець березня [15]	Працювали: - 7 блоків АЕС (1 знаходився у плановому ремонті). Упродовж декількох днів один з блоків Хмельницької АЕС перебував в стані аварійного ремонту; - 15 блоків ТЕС і ТЕЦ, три з яких використовували природний газ; - потужності ГЕС (після пошкодження ДніпроГЕС) склали 1,3 ГВт, тобто більше за прогнозовану величину 1,1 ГВт через паводок; - потужності СЕС і ВЕС наприкінці місяця зросли до 1,3 ГВт. Нестача генерації, навіть після атаки, не прогнозувалася. У пікові години потужність імпорту досягала максимуму – до 1,5 ГВт (після 22 березня).
Дата атаки	11 і 27 квітня
Пошкодження [16]	Сукупні втрати ОЕС України перевищили 7 ГВт установленої потужності. 14 разів залучалася аварійна допомога потужністю до 1,7 ГВт (25, 30 квітня). Локації уражених ТЕС: Бурштин, Ладизин, Добротвір, Київська область, Харків, Кривий Ріг, Дніпро.
Стан ОЕС України на кінець квітня [16]	Наприкінці квітня в ОЕС України працювали: - 6 блоків АЕС (3 - в плановому ремонті), - до 9 блоків ТЕС і ТЕЦ.
Дата атаки	4, 5, 6, 17, 18, 22 травня
Пошкодження [17]	Сукупні втрати ОЕС України досягли 8 ГВт установленої потужності. ДТЕК заявив, що 80% його потужностей пошкоджено або знищено. Серйозна шкода нанесена всім великим ТЕС. Порушені режими навантаження ГЕС Дніпровського каскаду та Дністровської ГЕС. Аварійна допомога залучалася 15 разів; максимальна спроможність перетинів по навантаженню - 1,7 ГВт, - використовувалася 17, 27, 28, 29 і 30 травня. 01.06.2024 постраждала Кременчуцька ГЕС та 2 ТЕС ДТЕК. 20, 22.06.2024 постраждали Трипільська, Зміївська, Криворізька ТЕС та ДніпроГЕС.
Стан ОЕС України на кінець травня [17]	Наприкінці травня працювали 7 блоків АЕС, один із них відновив роботу після 28 травня. Небаланс потужності був навіть у нічні години, через виведення з ладу більшості ТЕС. Щогодини генерувалося 9,0-9,3 ГВт електроенергії. Збалансувати систему вдалося лише 29 липня завдяки: - достроковому завершенню регламентних робіт на 2-х енергоблоках АЕС; - сезонно високому рівню генерації СЕС; - скороченню обсягів споживання електроенергії внаслідок зниження денної температури повітря з 35-37 °С до 25-27 °С.

Дата атаки	26 серпня
Пошкодження [18,19]	Ціллю атак стала інфраструктура видачі потужності АЕС. На відміну від попередніх атак, використані крилаті ракети були споряджені касетними бойовими частинами. Вимкнені блоки 1, 3 та 4 Рівненської АЕС, вимушено зменшена потужність Південноукраїнської АЕС. Увечері було вимкнено блок № 3 Південноукраїнської АЕС. Завдана російськими ударами шкода була б у рази більшою, якби не вжиття заходів із прикриття об'єктів ОЕС України, а також наявність на об'єктах передачі й розподілу електроенергії захисних споруд першого і другого рівнів захисту. Тимчасова втрата 1,5 ГВт потужності відбувалась за умов аномально високих температур повітря, що збільшувало обсяги споживання електроенергії на 1,0-1,3 ГВт. Пошкоджено: Київську ГЕС. Заявлено про: облаштування фізичного захисту енергетичних об'єктів з урахуванням того, що ворог почав використовувати крилаті ракети повітряного базування з касетними бойовими частинами; формування на об'єктах передачі й розподілу електроенергії розосереджених резервів уразливих компонентів.
Стан ОЕС України на кінець серпня [19, 20, 21]	Збалансувати систему вдалося за 11 діб, тобто на початку вересня. У вересні вже працювали: - 8 блоків АЕС, що генерували 5,4 ГВт. 1 блок залишався на технічному обслуговуванні; - від 4-х до 6-и блоків ТЕС і ТЕЦ, а також ГЕС і ГАЕС, які спільно виробляли 2,7 ГВт. Погіршення погодних умов зменшило ефективність СЕС, обсяги генерації електроенергії на цих станціях за місяць скоротилися майже вдвічі. У жовтні: - введено останній з 9-и відремонтованих енергоблоків АЕС; - введено 0,6 ГВт розподіленої генерації; - відновлено третину пошкодженої теплової потужності. Працювали: - 9 блоків АЕС, що генерували до 7,1 ГВт енергії; - 6-8 блоків ТЕС і ТЕЦ, а також ГЕС і ГАЕС, які спільно виробляли 3,8 ГВт. Потужність генерації ГЕС у жовтні зросла, але не перевищувала 0,7 ГВт. - Потужність генерації ВДЕ скоротилася до 0,7-0,9 ГВт. До атаки 17 листопада 2024 року у складі ОЕС України працювали: - 9 блоків АЕС, що загалом генерували до 7,5 ГВт. - 6-9 блоків ТЕС і ТЕЦ, та ГЕС і ГАЕС, які спільно виробляли 4,2-4,5 ГВт. - Генерація ГЕС зросла до 1,0 ГВт. - Потужність ВДЕ скоротилася до 0,5-0,7 ГВт. В першій половині листопада загальна потужність генерації складала від 12 до 14 ГВт.
Дата атаки	17 і 28 листопада
Пошкодження [21]	Пошкоджені: Бурштин, Добротвір, Кременчуцька ГЕС. Шкода була б у рази більшою, якби не ефективна робота ППО, та наявність на об'єктах передачі й розподілу електричної енергії захисту другого рівня. Потужність генерації АЕС і ТЕС скоротилася, що призвело до виникнення сталого дефіциту потужності до 3 ГВт. Після атак потужність імпорту в окремі години досягала 0,1-1,1 ГВт із доступних 2,1 ГВт. Використано до 23% пропускної спроможності міждержавних перетинів.
Дата атаки	13, 25 грудня
Пошкодження [22]	2 атаки на ОЕС України, під час яких було збільшено кількість засобів ураження. 13 грудня основними цілями крилатих ракет були високовольтні підстанції, що забезпечують функціонування міждержавних перетинів. Негативні наслідки 1-ї з атак вдалося мінімізувати завдяки ППО та наявності на об'єктах мережі захисних споруд 2-го рівня захисту. 25 грудня ворог атакував ТЕС і ГЕС, передусім на Лівобережній Україні. Нестача ППО призвела до виведення з ладу декількох об'єктів ТЕС і ГЕС, які через велику площу неможливо було захистити інженерними спорудами. Впродовж більшої частини грудня спостерігався небаланс потужності до 2 ГВт. Спостерігалось швидке скорочення дефіциту електроенергії через підвищення температури повітря.
Стан ОЕС України на кінець грудня [22]	У грудні працювали: - 9 блоків АЕС, що генерували до 7,8 ГВт; - до 10 енергоблоків ТЕС і ТЕЦ, а також ГЕС і ГАЕС, які спільно виробляли близько 5,2 ГВт; Потужність генерації ГЕС скоротилася, після 25 грудня вона не перевищувала 0,6 ГВт. Потужність генерації ВДЕ через погодні умови зросла до 1,0-1,2 ГВт. Загальні обсяги виробництва електроенергії становили 12-14 ГВт щогодини. Пропускна спроможність міждержавних перетинів використовувалася менше, аніж на половину.

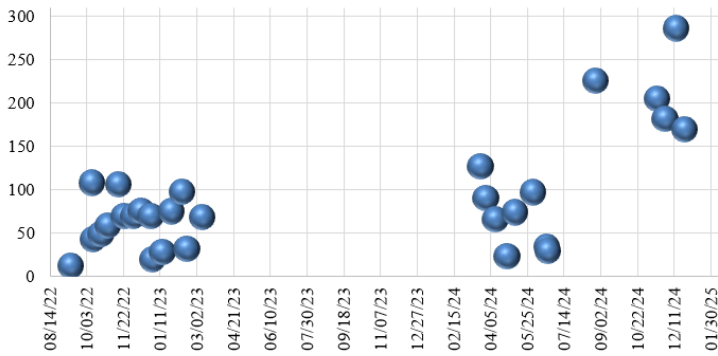


Рис. 4. Кількість ракет та дронів, застосованих росіянами для ударів по об'єктах критичної інфраструктури України впродовж 2022 – 2025 рр. [24].

- згодом удари почали наноситися по об'єктах гідроенергетики, які протягом весни, завдяки паводку, забезпечували стабільність роботи енергосистеми та значні обсяги виробництва електроенергії;
- напередодні опалювального сезону ціллю атак стало мережеве устаткування, яке забезпечувало видачу потужності АЕС. Тоді енергоблоки АЕС були вже відремонтовані та забезпечували більше половини виробництва електроенергії в країні;
- 13 грудня основними цілями атак стали високовольтні підстанції, які забезпечували імпорту електроенергії.

Тривалість планових стабілізаційних відключень електроенергії для побутових споживачів як наслідки російських систематичних масованих ракетно-дронових ударів по енергетичним об'єктам ОЕС України наведено на рис. 5.

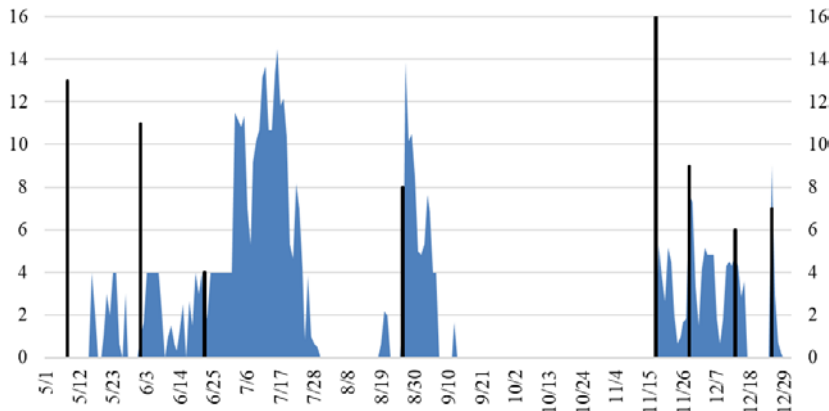


Рис. 5. Планові стабілізаційні відключення електроенергії для побутових споживачів в годинах за добу (графік синього кольору, вісь ординат ліворуч) та кількість крилатих ракет, які досягли цілей під час масованих ударів по об'єктах критичної інфраструктури України у 2024 році (графік чорного кольору, вісь ординат праворуч) [24,25, 26].

- стратегія ударів, кількість та склад застосованих засобів ураження;
- стан готовності устаткування, наявність резервів;
- погодні умови, які визначали попит на електроенергію, обсяги її виробництва ГЕС, СЕС та ВЕС;
- ступінь пошкодження енергетичного обладнання, який, в свою чергу, визначався ступенем захисту об'єктів енергетики системами ППО та захисними будівельними конструкціями;
- превентивне тимчасове відключення енергетичного обладнання та зупинка його роботи для мінімізації пошкоджень у разі влучання;
- введення чималих обсягів розподіленої генерації;
- постачання необхідних обсягів електроенергії з сусідніх країн.

Періоди нанесення ударів по критичній інфраструктурі України та кількість застосованих для цього ударних засобів представлені на рис. 4.

Удари наносилися у періоди найбільш складні для забезпечення балансу ОЕС України:

- весняний період, коли в ремонт були виведені енергоблоки АЕС;
- осінній період, коли почало стрімко зростати споживання електроенергії.

Цілі ударів змінювалися:

- на початку цілями атак, переважно, були обладнання теплової генерації та підстанції оператора енергосистеми;

Аналіз даних на рис. 5 дає змогу зробити висновки:

- атаки на енергосистему протягом кожного з періодів, що розглядаються, мали повторюваний характер, що можна пояснити обмеженою кількістю носіїв ударних засобів та спробами їх зекономити застосовуючи дорозвідку невражених об'єктів;
- незважаючи на більшу кількість застосованих засобів та вищу щільність ударів осіння атака мала менший вплив на енергосистему ніж весняна.

Основними факторами, які визначали стійкість енергосистеми були:

Дію механізмів впливу зазначених факторів відобразимо в математичній моделі режимів навантаження електроенергетичної системи.

Рівняння динаміки енергетичних об'єктів, доступних для використання в умовах систематичних терористичних атак.

Множина F_t генеруючих енергоблоків доступних для використання на поточний період часу t визначається множиною F_{t-1} генеруючих енергоблоків, які були доступними для використання в попередній період часу $t - 1$, а також множинами раніше пошкоджених генеруючих енергоблоків $dF_{t-TL,LD}$, $dF_{t-TM,MD}$ та $dF_{t-TS,SD}$, довготривалий, середній та короткотривалий ремонтів яких тривалістю TL , TM , TS , відповідно, були завершені на початок поточного періоду t , за винятком множин генеруючих енергоблоків $dF_{t,LD}$, $dF_{t,MD}$, $dF_{t,SD}$, які були уражені в період часу t та отримали, відповідно, великі, середні та дрібні пошкодження, тобто маємо динамічне рівняння

$$F_t = (F_{t-1} \cup dF_{t-TL,LD} \cup dF_{t-TM,MD} \cup dF_{t-TS,SD}) \setminus (dF_{t,LD} \cup dF_{t,MD} \cup dF_{t,SD}). \quad (1)$$

Для систем зберігання енергії та генеруючих установок, що використовують відновлювані джерела енергії, маємо рівняння, відповідно,

$$S_t = (S_{t-1} \cup dS_{t-TL,LD} \cup dS_{t-TM,MD} \cup dS_{t-TS,SD}) \setminus (dS_{t,LD} \cup dS_{t,MD} \cup dS_{t,SD}), \quad (2)$$

$$R_t = (R_{t-1} \cup dR_{t-TL,LD} \cup dR_{t-TM,MD} \cup dR_{t-TS,SD}) \setminus (dR_{t,LD} \cup dR_{t,MD} \cup dR_{t,SD}).$$

До пошкоджених енергоблоків АЕС, ТЕС, ГЕС, систем зберігання енергії таких типових для ОЕС України, як ГАЕС, а також генеруючих установок, що використовують відновлювані джерела енергії, будемо відносити як ті, що були уражені безпосередньо, так і ті, що втратили можливість підключення до енергосистеми через руйнування трансформаторних підстанцій та/або інших критично важливих мережевих об'єктів.

Множини $dX_{t,LD}$, $dX_{t,MD}$, $dX_{t,SD}$ енергетичних об'єктів типу $X \in \{F, S, R\}$, уражених в період

Таблиця 2	
Перший рівень - пасивний захист. Біг-беги та габїони.	21 область, 73 об'єкти енергетичної інфраструктури.
Другий рівень - захист від дронів та шахедів	14 областей, 22 підстанції, 63 елементи підстанцій для захисту.
Третій рівень - захист від ракет	14 областей, 22 станції.

часу t , визначаються відповідно до:

- 1) стратегічних цілей, обраних агресором при плануванні ударів разом з типом застосованої зброї та її кількості;
- 2) ефективності роботи системи проти повітряної оборони;
- 3) наявності захисних споруд та рівня захисту, який вони здатні забезпечувати (табл. 2 – рівні захисту енергетичних об'єктів ОЕС України [27].).

Для енергетичних об'єктів однакового типу $\forall X \in \{F, S, R\}$ результат дії перерахованих вище

факторів впливу можна представити у вигляді характеристики наслідків ураження цих об'єктів (рис. 6). Така характеристика відображає кількість уражених об'єктів $|dX_{t,LD}|$, $|dX_{t,MD}|$, $|dX_{t,SD}|$, кластеризованих за масштабністю їх руйнувань у три групи, відповідно: великі, середні та дрібні руйнування.

Енергетичні об'єкти типу $\forall X \in \{F, S, R\}$, які зазнали різних за масштабами руйнувань, для свого відновлення потребують виконання ремонтних робіт різної тривалості, відповідно, TL , TM , TS . Характеристика середньої тривалості таких робіт може бути представлена у вигляді діаграми (рис. 7).

За наявності необхідних запасів устаткування та матеріалів вважаємо прийнятними терміни відновлення енергогенеруючих та енергопередавальних об'єктів, в залежності від ступеня їх пошкодження, представлені у табл. 3.

Отже, користуючись такими характеристиками, а також рівняннями (2) (3), можна визначити множини F_t , R_t , S_t , різного типу генеруючих енергоблоків, систем зберігання енергії та генеруючих установок, що використовують відновлювані джерела енергії, доступні для навантаження в ЕЕС на поточний період часу t .

Важливо зазначити, що специфіка технологій розподіленої генерації, зокрема СЕС та ВЕС, передбачає:

- неможливість виведення з ладу великих потужностей одним ударом внаслідок розосередження обладнання;

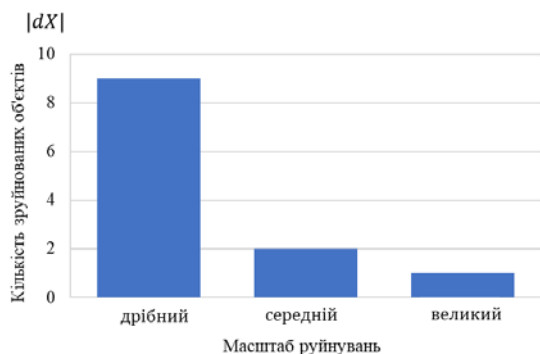


Рис. 6. Характеристика наслідків ушкодження енергетичних об'єктів типу X

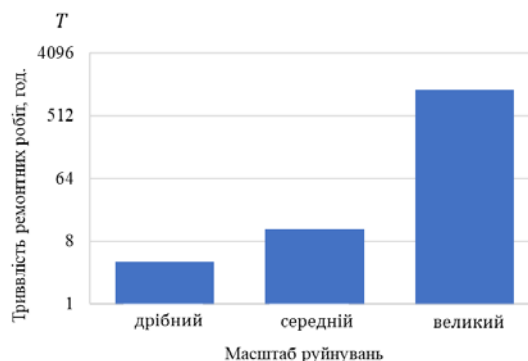


Рис. 7. Характеристика тривалості ремонтних робіт на пошкоджених енергетичних об'єктах типу X.

- зниження ефективності використання складних та, відповідно, дорогих засобів ураження внаслідок відносно низької одиничної вартості обладнання розподіленої генерації;
- короткі терміни відновлення працездатності обладнання.

Зазначимо, що введення в роботу понад 900 МВт потужностей розподіленої генерації [28] стало одним з основних чинників зниження ефективності терористичних атак на ОЕС України восени 2024 року.

Об'єкт/характер пошкоджень	ТЕС та ТЕЦ	Підстанції
Легкі пошкодження (без необхідності заміни обладнання)	1 тиждень	1-1,5 тижні
Середні пошкодження (заміна обладнання, запаси наявні)	1 місяць	1 місяць
Важкі пошкодження (за наявності обладнання та матеріалів)	6 місяців	1 місяць

Особливості імпорту електроенергії в умовах значних обсягів її тривалого дефіциту. Фактором, який дає можливість об'єктивно оцінити рівень дефіциту генеруючих потужностей в енергосистемі є обсяги імпорту електроенергії, графік зміни яких в ОЕС України представлено на рис. 8.

З графіка видно, що, за підсумками весняної масованої атаки, обсяги імпорту електроенергії зросли до 1800 МВт. В той же час, після здійснення осінньої масованої атаки обсяги імпорту досягли рівня 1500 МВт, що значно менше пропускної здатності міждержавних перетинів (2100 МВт) та демонструє відсутність значного рівня критичного дефіциту електроенергії, яку споживачі були б згодні покривати за високими цінами на зовнішніх енергоринках.

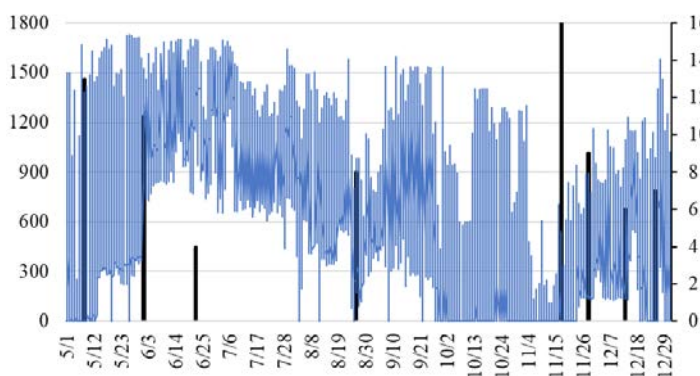


Рис. 8. Погодинні обсяги українського імпорту електроенергії протягом 2024 року в МВт-год (графік синього кольору, вісь ординат ліворуч) та кількість крилатих ракет, які досягли цілей під час масованих ударів по об'єктах критичної інфраструктури України протягом того ж 2024 року (графік чорного кольору, вісь ординат праворуч) [24, 29].

Необхідно зазначити, що для побутових споживачів електроенергії в Україні застосовується пільговий тариф 4,32 грн/кВт*год, який не покриває навіть ціни продажу електроенергії виробниками на оптовому ринку. Цей чинник суттєво обмежує залучення дорогої імпортової енергії для покриття дефіциту. В той же час, для комерційних споживачів було введено правило, згідно з яким споживачі, які покривають за рахунок імпорту більше 60% власного споживання електроенергії, не відключаються від електропостачання. В результаті здебільшого підприємства з безперервним циклом виробництва, а також некритичною часткою енергоносіїв у собівартості виробництва перейшли до імпорту електроенергії.

Кластерна математична модель навантаження електроенергетичної системи в умовах систематичних терористичних атак. Мінливість складу придатних до експлуатації енергетичних об'єктів є характерною ознакою ЕЕС, що знаходиться під руйнівним впливом систематичних масштабних терористичних атак та функціонує завдяки проведенню ремонтно-відновлювальних робіт та будівництва захисних споруд. Для дослідження резильєнтності такої ЕЕС автори розробили кластерну модель режимів її навантаження. Від відомих моделей режимів навантаження ЕЕС розроблена модель відрізняється наявністю рівнянь динаміки кількісного складу придатних до експлуатації енергетичних об'єктів, а також описом режимів навантаження не окремих енергетичних об'єктів, а їх однотипових множин (кластерів), що суттєво зменшує розмірність задач короткострокового прогнозування режимів з погодинною деталізацією. Задачі прогнозування режимів навантаження ЕЕС формулюються у вигляді задач змішаного цілочисельного лінійного програмування з цільовою функцією витрат на енергозабезпечення споживачів, які мінімізуються. Для розв'язування задач прогнозування застосовуються солвери CPLEX та SCIP.

Математичне формулювання задач прогнозування режимів навантаження ЕЕС має вигляд оптимізаційної задачі з цільовою функцією виду

$$\sum_{t \in T} \left(C_t^{imp} - C_t^{exp} + C_t^{Al} + \sum_{j \in J_F \cup J_R \cup J_S} C_{j,t} + \sum_{j \in J_F} (C_{j,t}^{SU} + C_{j,t}^{SD}) \right) \rightarrow \min. \quad (3)$$

Позначення, використані у співвідношенні (3), є такими:

- $t \in T$ поточний період часу t на прогнозному періоді T ;
- J_F множина типів генеруючих установок, в яких використовуються традиційні технології виробництва електроенергії;
- J_S множина типів енергетичних об'єктів, в яких використовуються технології зберігання електроенергії;
- J_R множина типів генеруючих установок, в яких використовуються відновлювані джерела енергії для виробництва електроенергії;
- C_j^{SU} витрати на пуск множини енергоблоків типу $j \in J_F$;
- C_j^{SD} витрати на зупинку множини енергоблоків типу $j \in J_F$.

Рівняння динаміки кількості однотипових енергетичних об'єктів ЕЕС.

Для поточного періоду часу t маємо рівняння динаміки множини генеруючих установок, які готові виробляти електроенергію за традиційною технологією типу $j \in J_F$, виду

$$F_{j,t} = (F_{j,t-1} \cup dF_{j,t-TL,LD} \cup dF_{j,t-TM,MD} \cup dF_{j,t-TS,SD}) \setminus (dF_{j,t,LD} \cup dF_{j,t,MD} \cup dF_{j,t,SD}), \quad (4)$$

рівняння динаміки множини енергетичних об'єктів, які готові забезпечувати зберігання електроенергії за технологією типу $j \in J_S$, виду

$$S_{j,t} = (S_{j,t-1} \cup dS_{j,t-TL,LD} \cup dS_{j,t-TM,MD} \cup dS_{j,t-TS,SD}) \setminus (dS_{j,t,LD} \cup dS_{j,t,MD} \cup dS_{j,t,SD}), \quad (5)$$

а також рівняння динаміки множини генеруючих установок, які готові виробляти електроенергію з відновлюваних джерел енергії за технологією типу $j \in J_R$

$$R_{j,t} = (R_{j,t-1} \cup dR_{j,t-TL,LD} \cup dR_{j,t-TM,MD} \cup dR_{j,t-TS,SD}) \setminus (dR_{j,t,LD} \cup dR_{j,t,MD} \cup dR_{j,t,SD}). \quad (6)$$

Генеруючі енергоблоки, в яких використовується викопне паливо. Для множини $F_{j,t}$ генеруючих енергоблоків типу j , в яких використовується викопне паливо для виробництва електроенергії, маємо:

- експлуатаційні витрати на ті енергоблоки, які перебувають в режимі навантаження

$$C_{j,t} = \bar{C}_j u_{j,t} + \check{C}_j \check{p}_{j,t}; \quad (7)$$

- обмеження зверху величини маневру потужністю енергоблоків в режимі навантаження

$$\check{p}_{j,t} - (\bar{P}_j - \underline{P}_j) u_{j,t} \leq 0; \quad (8)$$

- вираз для потужності енергоблоків в режимі навантаження

$$p_{j,t} = \underline{P}_j u_{j,t} + \check{p}_{j,t}; \quad (9)$$

- обмеження зверху потужності енергоблоків в режимі навантаження

$$p_{j,t} \leq \bar{P}_j u_{j,t}; \quad (10)$$

- обмеження знизу потужності енергоблоків в режимі навантаження

$$p_{j,t} \geq \underline{P}_j u_{j,t}; \quad (11)$$

- балансове рівняння між кількостями енергоблоків, які перебувають в режимах пуску, навантаження та зупинки

$$y_{j,t} - x_{j,t} - u_{j,t} + u_{j,t-1} = 0, \quad t > 1; \quad (12)$$

- обмеження зверху сумарної кількості енергоблоків, які перебувають в режимах пуску та зупинки

$$y_{j,t} + x_{j,t} \leq |F_{j,t}|; \quad (13)$$

- обмеження зверху кількості енергоблоків, які перебувають в режимі навантаження

$$u_{j,t} \leq |F_{j,t}|; \quad (14)$$

- обмеження знизу тривалості перебування енергоблоків в режимі їх пуску

$$\sum_{i=t-UT_j+1}^t y_{j,i} \leq u_{j,t}, \quad t \geq UT_j; \quad (15)$$

- обмеження знизу тривалості перебування енергоблоків в режимі їх зупинки

$$\sum_{i=t-DT_j+1}^t x_{j,i} \leq u_{j,t-DT_j}, \quad t \geq DT_j; \quad (16)$$

- обмеження зверху швидкості збільшення потужності енергоблоків

$$p_{j,t} - p_{j,t-1} \leq \Delta P_j^{up} u_{j,t-1} + P_j^{SU} y_{j,t}, \quad t > 1; \quad (17)$$

- обмеження знизу швидкості зменшення потужності енергоблоків

$$p_{j,t} - p_{j,t-1} \geq -\Delta P_j^{down} u_{j,t} - P_j^{SD} x_{j,t}, \quad t > 1; \quad (18)$$

- експлуатаційні витрати на енергоблоки, які перебувають в режимі пуску

$$C_{j,t}^{SU} = \bar{C}_j^{SU} y_{j,t}; \quad (19)$$

- експлуатаційні витрати на енергоблоки, які перебувають в режимі зупинки

$$C_{j,t}^{SD} = \bar{C}_j^{SD} x_{j,t}. \quad (20)$$

Позначення, використані у співвідношенні (7)-(20), є такими:

DT_j	мінімальна тривалість перебування енергоблоків типу $j \in J_F$ в режимі їх зупинки;
UT_j	мінімальна тривалість перебування енергоблоків типу $j \in J_F$ в режимі їх пуску;
\bar{C}_j^{SU}	витрати на пуск енергоблока типу $j \in J_F$;
\bar{C}_j^{SD}	витрати на зупинку енергоблока типу $j \in J_F$;
\bar{C}_j	експлуатаційні витрати на енергоблок типу $j \in J_F$ при мінімальному навантаженні;
\check{C}_j	коефіцієнт еластичності експлуатаційних витрат на енергоблок типу $j \in J_F$;
$\bar{P}_j, \underline{P}_j$	максимальне та мінімальне навантаження енергоблоків типу $j \in J_F$;
P_j^{SU}	мінімально допустиме навантаження енергоблоку типу $j \in J_F$ після пуску;
P_j^{SD}	максимально допустиме навантаження енергоблоку типу $j \in J_F$ перед зупинкою;
ΔP_j^{up}	максимально допустимий приріст навантаження енергоблоку типу $j \in J_F$;
ΔP_j^{down}	максимально допустиме розвантаження енергоблоку типу $j \in J_F$;
$C_{j,t}$	витрати на виробництво електроенергії енергоблоками типу $j \in J_F$ за період часу t ;
$p_{j,t}$	навантаження енергоблоків типу $j \in J_F$ на періоді часу t ;
$\tilde{p}_{j,t}$	змінна величина потужності енергоблоків типу $j \in J_F$ на періоді часу t ;
u, y, x	цілочисельні функції, які для множини $F_{j,t}$ енергоблоків типу $j \in J_F$ на періоді часу t приймають значення кількості працюючих енергоблоків в режимах навантаження, зупинки та пуску, відповідно.

Генеруючі енергоблоки ГЕС. Для множини $F_{j,t}$ генеруючих енергоблоків типу $j \in J_F$, в яких використовується водна енергія річок для виробництва електроенергії, маємо

- маржинальні витрати на енергоблоки

$$C_{j,t} = \bar{C}_j + \check{C}_j p_{j,t}; \quad (21)$$

- відповідність суми поточних навантажень енергоблоків добовому обсягу виробництва електроенергії, що відповідає погодним умовам та встановленим екологічним обмеженням

$$\sum_{t \in T_d} p_{j,t} = P_{j,d}^{sum}; \quad (22)$$

– обмеження зверху потужності енергоблоків в режимі навантаження

$$p_{j,t} \leq \bar{P}_j; \quad (23)$$

– обмеження знизу потужності енергоблоків в режимі навантаження

$$p_{j,t} \geq \underline{P}_j; \quad (24)$$

– обмеження зверху та знизу дольової участі енергоблоків множини ГЕС J_H , які функціонують в каскадному режимі,

$$\underline{part}_j \leq p_{j,t} / \sum_{j \in J_H} p_{j,t} \leq \overline{part}_j. \quad (25)$$

Позначення, використані у співвідношеннях (21)-(25), є такими:

\bar{C}_j	експлуатаційні витрати на енергоблоки типу $j \in J_F$ при мінімальному навантаженні;
\tilde{C}_j	коефіцієнт еластичності експлуатаційних витрат на енергоблоки типу $j \in J_F$;
$C_{j,t}$	витрати на виробництво електроенергії енергоблоками типу $j \in J_F$ за період часу t ;
$\bar{P}_j, \underline{P}_j$	максимальне та мінімальне навантаження енергоблоків типу $j \in J_F$;
$p_{j,t}$	навантаження енергоблоків типу $j \in J_F$ на періоді часу t ;
\overline{part}	максимальна частка дольової участі енергоблоків ГЕС, яка працює в каскадному режимі;
\underline{part}	мінімальна частка дольової участі енергоблоків ГЕС, яка працює в каскадному режимі;
$P_{j,d}^{sum}$	добовий обсяг виробництва електроенергії енергоблоками ГЕС типу $j \in J_F$, що відповідає погодним умовам та встановленим екологічним обмеженням;
T_d	множина періодів часу t загальною тривалістю одна доба.

Системи зберігання енергії. Для множини $S_{j,t}$ систем зберігання енергії типу $j \in J_S$ маємо:

– експлуатаційні витрати на ті системи зберігання енергії, які перебувають в режимі навантаження

$$C_{j,t} = c_j^A (1 - \eta_j^A) p_{j,t}^A - c_j^G (1 - \eta_j^G) p_{j,t}^G; \quad (26)$$

– балансові рівняння систем зберігання енергії

$$q_{j,t} - q_{j,t-1} - \eta_j^A p_{j,t}^A + \frac{p_{j,t}^G}{\eta_j^G} = 0, \quad t > 1; \quad (27)$$

– обмеження знизу обсягу зберігання енергії

$$|S_{j,t}| q_j - q_{j,t} \leq 0; \quad (28)$$

– обмеження зверху обсягу зберігання енергії

$$q_{j,t} - |S_{j,t}| \bar{q}_j \leq 0; \quad (29)$$

– обмеження зверху потужності прямого перетворення накопиченої енергії в електричну

$$p_{j,t}^G - u_{j,t}^{AG} |S_{j,t}| \bar{p}_j^G \leq 0; \quad (30)$$

– обмеження знизу потужності зворотного перетворення енергії

$$p_{j,t}^A - (1 - u_{j,t}^{AG}) |S_{j,t}| \bar{p}_j^A \leq 0. \quad (31)$$

Позначення, використані у співвідношеннях (26)-(31), є такими:

$C_{j,t}$	витрати на функціонування акумуляторів типу $j \in J_S$ за період часу t ;
η^A, η^G	ефективність акумулятора в режимах заряджання та розряджання;
c^A, c^G	питомі витрати на акумулятор в режимах заряджання та розряджання;
\bar{q}, q	максимальний та мінімальний обсяг енергії, яку може зберігати акумулятор;
\bar{p}^A, \bar{p}^G	максимальні потужності навантаження акумулятора в режимах заряджання та розряджання;
p^A, p^G	навантаження акумуляторів в режимах заряджання та розряджання;
q	кількість електроенергії, накопиченої в акумуляторах;
u^{AG}	бінарна функція, яка приймає значення 0, якщо акумулятори працюють в режимі заряджання та 1 – в режимі розряджання.

Генеруючі установки з відновлюваними джерелами енергії. Для множини $R_{j,t}$ генеруючих установок типу j , в яких використовуються відновлювані джерела енергії, маємо:

– експлуатаційні витрати

$$C_{j,t} = 0; \quad (32)$$

– поточні обсяги виробництва електроенергії

$$p_{j,t} - \overline{P}_j^{tech} E_{j,t} |R_{j,t}| = 0. \quad (33)$$

Позначення, використані у співвідношеннях (32)-(33), є такими:

\overline{P}_j^{tech}

максимальна потужність відновлюваних джерел типу $j \in J_R$;

$E_{j,t}$

коефіцієнт ефективності використання встановленої потужності установки з ВДЕ типу $j \in J_R$ на періоді часу t ;

$p_{j,t}$

навантаження установки з ВДЕ типу $j \in J_R$ на періоді часу t .

Імпорт та експорт електроенергії. Для обсягів імпорту та експорту електроенергії маємо:

– витрати на купівлю електроенергії на зовнішніх ринках

$$C_t^{imp} = (Pr_t^{TL} + Pr_t^{TSO}) p_t^{imp}; \quad (34)$$

– обмеження обсягів імпорту пропускнуою здатністю міждержавних перетинів

$$p_t^{imp} \leq h_t H; \quad (35)$$

– дохід від продажу електроенергії на зовнішніх ринках

$$C_t^{exp} = (Pr_t^{TL} - Pr_t^{TSO}) p_t^{exp}; \quad (36)$$

– обмеження обсягів експорту пропускнуою здатністю міждержавних перетинів

$$p_t^{exp} \leq (1 - h_t) H. \quad (37)$$

Позначення, використані у співвідношеннях (34)-(37), є такими:

p_t^{imp}

навантаження міждержавного перетину в режимі імпорту електроенергії;

p_t^{exp}

навантаження міждержавного перетину в режимі експорту електроенергії;

h

бінарна функція, яка приймає значення 0, при імпорті електроенергії та 1 – при експорті;

H

максимальна потужність міждержавних перетинів;

C_t^{exp}

дохід від обсягів експорту електроенергії;

C_t^{imp}

витрати на купівлю електроенергії по імпорту.

Pr_t^{TL}

ціна електроенергії на закордонних ринках;

Pr_t^{TSO}

тариф на передачу електроенергії.

Баланс обсягів виробництва та споживання електроенергії. Математичний опис навантаження електроенергетичної системи завершують рівняння балансу обсягів виробленої та спожитої потужності

$$p_t^{imp} + \sum_{i \in F_t \cup R_t} p_{i,t} + \sum_{i \in S_t} p_{i,t}^G - l_t + \Delta l_t - p_t^{exp} - \sum_{i \in S_t} p_{i,t}^A = 0. \quad (38)$$

У рівнянні (38) використані наступні умовні позначення:

l

обсяг попиту на електроенергію;

Δl

обсяг розвантаження споживачів електроенергії.

Розвантаження споживачів електроенергії. У разі застосування графіків розвантаження споживачів задля балансування обсягів виробництва та споживання електроенергії, виникають додаткові витрати на компенсацію збитків, нанесених споживачам. Такі витрати визначаються співвідношенням

$$C_t^{\Delta l} = c^{\Delta l} \Delta l_t. \quad (39)$$

Позначення, використані у співвідношенні (39), є такими:

$C_t^{\Delta l}$

питомі втрати споживачів внаслідок обмеження споживання;

$C^{\Delta l}$

загальні витрати на компенсацію збитків розвантаженим споживачам.

Очевидно, обсяги розвантаження споживачів не перевищують їх попит на електроенергію, тобто

$$0 \leq \Delta l_t \leq l_t. \quad (40)$$

Коефіцієнт резильєнтності ЕЕС. Рівень задоволення попиту на електроенергію будемо оцінювати динамічним коефіцієнтом

$$\mathbb{R}_{t,\Delta T} = \sum_{t-\Delta T}^t (l_t - \Delta l_t) / \sum_{t-\Delta T}^t l_t, \quad t > \Delta T, \quad (41)$$

значення якого для будь-якого t на відрізку часу $[t, t - \Delta T]$ тривалістю ΔT характеризує резильєнтність ЕЕС, тобто її готовність виконувати свою функцію.

Для проведення обчислювальних експериментів запропоновану модель ЕЕС у вигляді задачі змішаного цілочисельного лінійного програмування реалізовано у додатку IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Version 20.1 з використанням мови програмування OPL.

Задачі моделювання електроенергетичної системи та оцінювання її резильєнтності в умовах систематичних терористичних атак. Кластерна математична модель навантаження ЕЕС (3)-(41) забезпечує короткострокове, на період до одного року, прогнозування режимів її роботи та розвантаження споживачів в умовах систематичних масштабних ракетно-дронових атак. Модель призначена для оцінювання резильєнтності ЕЕС за наступних сценарних умов:

- очікуваних стратегій атак – їхньої періодичності, масштабності та цілеспрямованості;
- динаміки ефективності роботи систем ППО щодо захисту енергетичних об'єктів;
- запланованих графіків введення в експлуатацію захисних споруд різного рівня захисту;
- динаміки ефективності застосування резервних механізмів та достатності ресурсів для виконання ремонтних робіт.

Для кожного типу енергетичних об'єктів зазначені сценарні умови відображаються у вигляді характеристик наслідків їх ушкодження (рис. 6) та тривалості ремонтних робіт (рис. 7).

Крім того, запропонована модель ЕЕС є інструментом аналізу її резильєнтності в умовах:

- руйнівного впливу ракетно-дронових атак на транскордонні з'єднання України;
- реалізації планів з будівництва нових транскордонних з'єднань;
- ризиків прийняття окремими країнами-сусідами політичних рішень щодо обмежень обсягів експорту-імпорту електроенергії.

Висновки.

Російська війна проти України наразі відбувається одночасно на трьох фронтах – військовому, енергетичному та інформаційному.

За трирічний період війни російський тиск на ОЕС України як на об'єкт своєї військової стратегії суттєво еволюціонував: від початкових зусиль із захоплення важливих об'єктів та підсистем через пізніші спроби знищити енергетичні об'єкти, які підтримують військову оборону України, до нинішньої кампанії систематичного і широкомасштабного руйнування системи з метою тероризування всього населення [30].

Енергетичний фронт є предметом особливої уваги провідних вітчизняних та закордонних аналітичних центрів. Незважаючи на суттєві обмеження на оприлюднення даних щодо функціонування ОЕС України, дослідники аналізують її поточний стан та, особливо, резильєнтність, яка постійно змінюється.

Традиційно резильєнтність ЕЕС як спроможність системи відновлювати власну функціональність аналізується лише за умов впливу природних явищ, технологічних збоїв, помилок та навмисних руйнівних атак. Навмисна атака, зазвичай, моделюється як засіб руйнівного впливу терористичних організацій на окремі об'єкти електроенергетики з метою завдати великої шкоди атакованій країні [7,8,9]. Таким чином, основна увага дослідників досі була зосереджена на загрозах тероризму, а не на насильстві між державами [30, 31]. Саме тому український досвід, отриманий на енергетичному фронті є унікальним для всього світу.

Запропонована кластерна математична модель режимів навантаження ЕЕС дає змогу оцінювати її резильєнтність в умовах руйнівного впливу ракетно-дронових атак, дії засобів системи протиповітряної оборони та зусиль з відновлення зруйнованих енергетичних об'єктів. Така модель надає можливість вперше вирішувати задачі короткострокового прогнозування режимів навантаження ЕЕС в умовах терористичних атак, які здійснює держава-агресор.

Надалі на основі запропонованої моделі будуть проведені дослідження різних сценаріїв розвитку ОЕС України, особливо, розбудови структурно мінливої децентралізованої електроенергетики [10] з встановленням систем збереження енергії, генеруючих установок, в яких використовуються відновлювані джерела енергії, газотурбінних та газопоршневих електростанцій [32].

Фінансування роботи. Статтю підготовлено за матеріалами досліджень, що фінансуються Міністерством освіти і науки України (за програмою спільних українсько-німецьких наукових проєктів для реалізації у 2024-2025 роках: проєкт «Паралельне моделююче середовище для планування розвитку електроенергетичних систем з відновлюваними та ядерними джерелами енергії», номер державної реєстрації: 0124U002691) та Центром інженерних досліджень і розвитку армії США (грант W911NF-22-2-0153 «AI Methods and Tools for Integrating Resilience Analytics and Edge Computing for Energy Systems»).

MODELING THE ELECTRIC POWER SYSTEM OF UKRAINE AND ASSESSING ITS RESILIENCE UNDER CONDITIONS OF SYSTEMATIC TERRORIST ATTACKS

S.Ye. Saukh¹, A.V. Borysenko²

¹ Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of the NAS of Ukraine,
General Naumov Str., 15, Kyiv, 03164, Ukraine,
e-mail: ssaukh@gmail.com

² National Technical University of Ukraine "I. Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
pr. Beresteyskiy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.
e-mail: andborys@ukr.net

Abstract. The analysis of the destructive impact of the periodic massive missile and drone attacks on the electric power system of Ukraine is carried out. The consequences of the attacks are represented in terms of the characteristics of the destruction of typical power industry facilities. Each of these characteristics reflects the distribution of the number of destroyed facilities according to the scale of the destruction: small, medium, and large-scale. The dependence of the duration of repair works on the scale of destruction represents the repair works of destroyed facilities of a certain type. The dynamics equations of sets of power units of different types available for the current period of time could be written on the basis of the introduced characteristics of destruction of power units and the duration of their repair. The damaged NPPs, TPPs, HPPs, damaged PSPPs, and damaged renewable energy facilities comprise the units which have been directly damaged and the units which have lost the ability to work in parallel with the power grid due to the destruction of substations and/or other critical network equipment. In order to study the resilience of the Ukrainian power system to large-scale missile and drone strikes, we have proposed a cluster mathematical model of the load modes of such a system, consisting of typical power equipment, supplemented with the dynamics equations of subsets of this equipment that can be used in current period. This model provides a solution to the problem of predicting the readiness of the electric power system of Ukraine to fulfill its main functional purpose - to satisfy the demand for electricity. Our task was to study Ukrainian power system resistance to systematic large scale missile and drone strikes. References 32, figures 8, tables 3.

Keywords: power system, resilience, model, missile and drone attacks.

1. Saukh S. Degradation and Collapse of Dynamic Systems (Version 1). Resilience of Dynamic Systems, Kyiv. 2024. Zenodo. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14549595>.
2. Chong Wang, et. al. A systematic review on power system resilience from the perspective of generation, network, and load. 2022. Renewable and Sustainable Energy Reviews 167(3): 112567. 21 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112567>.
3. Daeli A., Mohagheghi S. Power Grid Infrastructural Resilience against Extreme Events. Energies 2023, 16, 64. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16010064>.
4. Erenoğlu A. K., Sengor I., Erdinç O. Power System Resiliency: A Comprehensive Overview from Implementation Aspects and Innovative Concepts. -Energy Nexus, vol.15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100311>.
5. Zhou S., Li Y., Jiang C., Xiong Z., Zhang J. and Wang L. Enhancing the resilience of the power system to accommodate the construction of the new power system: key technologies and challenges. Frontiers Energy Research. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1256850>.
6. Bhusal N., Gautam M., Abdelmalak M. and Benidris M., "Modeling of Natural Disasters and Extreme Events for Power System Resilience Enhancement and Evaluation Methods," 2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Liege, Belgium, 2020, pp. 1-6.
7. Bhusal,N., Abdelmalak M., Kamruzzaman M. and Benidris M., "Power System Resilience: Current Practices, Challenges, and Future Directions," in IEEE Access, vol. 8, 2020, pp. 18064-18086.
8. Lei S., Wang C. and Hou Y., "Power Grid Resilience against Natural Disasters: Preparedness, Response, and Recovery," Wiley-IEEE Press, 2023.

9. Narayanan A., Welburn J. W., Miller B. M., Li S. T., Clark-Ginsberg A. Deterring Attacks Against the Power Grid. Two Approaches for the U.S. Department of Defense. RAND Corporation, Santa Monica, Calif., 2020.
10. Saukh S. A Structurally Variable Electric Power System Resistant to Terrorist and Military Threats. IEEE 13th International Conference on *Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Athens, Greece, 13-15 October 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416549>.
11. Stout S., Lee N., Cox S., Elsworth J. and Leisch J. Power sector resilience planning guidebook. U.S. Department of Energy's NREL and USAID. 2019.
12. Yao X., Wei H. H., Shohet I. M. and Skibniewski M. J. Assessment of Terrorism Risk to Critical Infrastructures: The Case of a Power-Supply Substation. *Applied Sciences*, vol. 10 (20), 2020, 7162.
13. Passing of the Autumn-Winter Periods 2022-2024: State of the Energy System. DiXi Group. Kyiv. 2024/. URL: https://dixigroup.org/wp-content/uploads/2024/04/2024_winterseasons_analysis_dixi_group_final.pdf (accessed at 03.02.2025)
14. Ukraine: From War To Peace and Recovery. Analytical Assessments. February 2024. (Ukr). URL: <https://razumkov.org.ua/images/2024/03/20/2024-PAKT-February-2.pdf> (accessed at 13.01.2025)
15. Ukraine: From War To Peace and Recovery. Analytical Assessments. March 2024. (Ukr). URL: <https://razumkov.org.ua/images/2024/04/08/2024-PAKT-March-3.pdf> (accessed at 15.12.2024)
16. Ukraine: From War To Peace and Recovery. Analytical Assessments. April 2024. (Ukr). URL: <https://razumkov.org.ua/images/2024/05/14/2024-PAKT-APRIL-6.pdf> (accessed at 15.12.2024)
17. Ukraine: From War To Peace and Recovery. Analytical Assessments. May 2024. (Ukr). URL: <https://razumkov.org.ua/images/2024/06/06/2024-PAKT-MAY.pdf> (accessed at 15.12.2024)
18. Ukraine: From War To Peace and Recovery. Analytical Assessments. August 2024. (Ukr). URL: <https://razumkov.org.ua/images/2024/09/11/2024-PAKT-AUGUST.pdf> (accessed at 17.12.2024)
19. Ukraine: From War To Peace and Recovery. Analytical Assessments. September 2024. (Ukr). URL: <https://razumkov.org.ua/images/2024/10/10/2024-PAKT-SEPTEMBER-1.pdf> (accessed at 17.12.2024)
20. Ukraine: From War To Peace and Recovery. Analytical Assessments. October 2024. (Ukr). URL: <https://razumkov.org.ua/images/2024/11/07/2024-PAKT-OCTOBER-RC.pdf> (accessed at 17.12.2024)
21. Ukraine: From War To Peace and Recovery. Analytical Assessments. November 2024. (Ukr). URL: <https://razumkov.org.ua/images/2024/12/10/2024-PAKT-November-RC.pdf> (accessed at 17.12.2024)
22. Ukraine: From War To Peace and Recovery. Analytical Assessments. December 2024. (Ukr). URL: <https://razumkov.org.ua/images/2025/01/16/2024-PAKT-December-RC.pdf> (accessed at 13.01.2025)
23. Kyrylenko O.V., Pavlovsky V.V., Blinov I.V. Scientific and technical support for organizing the work of the IPS of Ukraine in synchronous mode with the Continental European power system ENTSO-E. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 5. Pp. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.05.059>. (Ukr)
24. Information on massive attacks on Ukraine's critical infrastructure. (Ukr). URL: <https://map.ua-energy.org/uk/resources/12f3148d-841a-478d-b9ed-72bf0764b286/> (accessed at 13.01.2025)
25. Information on the application of measures to limit electricity consumption. (Ukr). URL: <https://map.ua-energy.org/uk/resources/0f8f9882-1fb2-47c6-81dc-31fbad914f16/> (accessed at 13.01.2025)
26. Power outage 2024: what are queues and how do they work – explanation from Ukrenergo. New Voice. November 11th, 2024. URL: <https://nv.ua/ukr/ukraine/events/vidklyuchennya-svitla-shcho-take-chergi-i-yak-pracyuyut-poyasnennya-ukrenergo-50433788.html> (accessed at 10.02.2025)
27. Ukraine plans to install defense from missiles at 22 energy facilities by the end of the year. State Agency for the Restoration and Development of Infrastructure of Ukraine. 30.01.2024. (Ukr). URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3820285-v-ukraini-planuut-do-kinca-roku-vstanoviti-zahist-vid-raket-na-22-obektah-energetiki.html> (accessed at 10.02.2025)
28. Ignatiev S. How business is changing the energy landscape of Ukraine. *Balance of Energy of Ukraine*. 2025. No 1(81). (Ukr). URL: <https://enerhodzherela.com.ua/novyny> (accessed at 10.02.2025)
29. Information on hourly volumes of exported and imported electricity. (Ukr). URL: <https://map.ua-energy.org/uk/resources/56df70b0-6bc1-4c7d-a82f-284cf723438d/> (accessed at 10.02.2025)
30. Jermalavičius Tomas (editor), et. al. War and Energy Security: Lessons for The Future. Tallinn: International Center for Defence and Security, May 2023. 85 p. URL: <https://icds.ee/en/war-and-energy-security-lessons-for-the-future/> (accessed at 10.02.2025)
31. Good Practices Guide on Non-Nuclear Critical Energy Infrastructure Protection (NNCEIP) from Terrorist Attacks Focusing on Threats Emanating from Cyberspace. Vienna, Organization for Security and Co-operation in Europe (OSCE), 2013, 100 p.
32. Saukh S. and Borysenko A. Modeling of Local Power Systems Development under Conditions of Military Operations. IEEE 13th International Conference on *Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Athens, Greece, 13-15 October 2023. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416523>.

Надійшла 17.02.2025