

УДК 621.396.21

DOI: 10.31673/2786-8362.2024.021428

Дроголо М.О., Кириченко Р.М.,
Домрачева К.О., к.т.н.

ШЛЯХИ ПІДТРИМУВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ ПІД ЧАС БЛЕКАУТІВ В УКРАЇНІ

Drohoho M.O., Kyrychenko R.M., Domracheva K.O. Ways of maintaining the operability of cellular base stations during blackouts in Ukraine. The article examines the challenges of ensuring uninterrupted operation of mobile communication base stations during prolonged power outages, which is becoming increasingly relevant in the context of heightened energy instability. Special attention is given to the analysis of backup power technologies, such as battery systems, diesel and mobile generators, as well as alternative sources including solar panels and microgrids. Innovative approaches to optimizing energy efficiency in 5G networks are described, including intelligent monitoring systems, energy consumption management, and practices utilizing renewable energy sources. The international experiences of Japan and the USA are discussed, which may be beneficial for Ukrainian communication operators. The article offers recommendations for improving the autonomous power supply of base stations in Ukraine to enhance network resilience to blackouts, ensure stable communication, and increase security in extreme conditions.

Keywords: base stations, mobile communication, blackouts, backup power, storage batteries, diesel generators, mobile generators, solar panels, microgrids, energy efficiency

Дроголо М.О., Кириченко Р.М., Домрачева К.О. Шляхи підтримування працездатності базових станцій стільникового зв'язку під час блекаутів в Україні. У статті розглядаються проблеми безперебійної роботи базових станцій мобільного зв'язку під час тривалих відключень електроенергії в умовах енергетичної нестабільності. Аналізуються технології резервного живлення, такі як акумуляторні батареї, дизельні генератори та альтернативні джерела, зокрема сонячні панелі. Окремо приділено увагу інноваційним підходам до енергоефективності в мережах 5G через системи моніторингу та управління. Розглядається досвід Японії та США, який може бути корисним для українських операторів. Стаття пропонує рекомендації для вдосконалення енергозабезпечення базових станцій в Україні з метою підвищення стійкості мереж до блекаутів.

Ключові слова: базові станції, мобільний зв'язок, блекаути, резервне живлення, акумуляторні батареї, дизельні генератори, мобільні генератори, сонячні панелі, мікромережі, енергоефективність

Вступ

Сучасна залежність суспільства від засобів комунікації особливо проявляється в умовах екстремальних ситуацій, таких як блекаути, що виникають через відключення електроенергії внаслідок надзвичайних ситуацій, воєнних дій або природних катастроф. Мобільний зв'язок у ці моменти є критично важливим для координації рятувальних операцій, забезпечення безпеки громадян, а також для підтримки комунікації між рідними. Підтримка працездатності базових станцій стільникового зв'язку під час таких блекаутів — одне з найважливіших завдань для мобільних операторів в Україні.

В умовах зростаючої частоти відключень електроенергії, питання стабільності роботи мобільних мереж стає надзвичайно актуальним. Мобільний зв'язок є основним засобом комунікації для мільйонів людей, особливо під час надзвичайних ситуацій, коли можливість оперативного зв'язку з рідними або екстреними службами може бути питанням безпеки і життя. Однак блекаути становлять значний виклик для безперервної роботи базових станцій, які, як правило, розраховані на постійне електропостачання.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз останніх досліджень, викладених у статті та її джерелах, відображає актуальність проблеми забезпечення працездатності базових станцій мобільного зв'язку під час тривалих відключень електроенергії (блекаутів) в Україні. Деякі з цих питань розглянуті Міністерством цифрової трансформації України [1]. Дослідження акцентують увагу на впровадженні ефективних резервних джерел живлення, зокрема літій-іонних та натрій-іонних батарей, дизельних і мобільних генераторів, а також сонячних панелей. Завдяки звітам комісії НКЕК[2],[3] нам стає відома інформація, як оператори мобільного зв'язку підвищують відмовостійкість базових станцій.

© Дроголо М.О., Кириченко Р.М., Домрачева К.О. 2024

Особливий інтерес викликає застосування інноваційних підходів, таких як мікромережі[4], системи інтелектуального моніторингу та управління енергоспоживанням, D2D [5] які дозволяють знижувати навантаження на мережу та підвищувати енергоефективність. Також, був розглянутий досвід реагування інших країн на надзвичайні ситуації [6].

Дослідження [7] демонструють значний потенціал мереж 5G у застосуванні алгоритмів оптимізації енергоспоживання, зокрема через технології Massive MIMO, Beamforming та використання малих осередків (small cells), що мінімізують витрати енергії. Застосування відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові станції, є особливо актуальним для віддалених регіонів, де доставка пального ускладнена.

Метою роботи є визначення ефективних заходів та технологічних рішень для підтримки працездатності базових станцій мобільного зв'язку в умовах тривалих відключень електроенергії в Україні.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Вплив блекаутів на роботу мобільних мереж. Блекаути, або тривалі відключення електроенергії, мають руйнівний вплив на роботу мобільних мереж, створюючи серйозні виклики як для операторів, так і для користувачів. Мобільний зв'язок, що став основним засобом комунікації в умовах надзвичайних ситуацій, критично залежить від стабільного електропостачання. Коли електрика зникає, базові станції, призначені для безперервної роботи, залишаються без живлення і припиняють функціонувати. Це призводить до часткової або повної втрати покриття, що особливо небезпечно в регіонах з низькою щільністю населення, де мобільний зв'язок є єдиним способом комунікації.

Під час блекаутів люди одночасно намагаються вийти на зв'язок з рідними або отримати інформацію від служб надзвичайних ситуацій, що суттєво збільшує навантаження на мережі. Базові станції працюють в умовах перевантаження, потребуючи більше електроенергії, яка не завжди доступна навіть у резервних джерелах. Збої у роботі мобільного зв'язку можуть призвести до відчутних наслідків для різних сфер життя, включаючи фінансові операції, логістику та роботу служб безпеки.

Методи забезпечення резервного живлення базових станцій. Оператори мобільного зв'язку впроваджують різні методи резервного живлення для підтримки базових станцій під час блекаутів. Від вибору цих методів залежить не лише час автономної роботи станцій, але й рівень стабільності мережі. Розглянемо основні варіанти.

Акумуляторні батареї

Акумуляторні батареї – це стандартне рішення для резервного живлення базових станцій. Їхня компактність і низька вартість роблять їх зручними для швидкої установки. Проте ємність батарей обмежує час автономної роботи до кількох годин, зазвичай від 2 до 8 годин. Наприклад, у міських районах більшість станцій обладнано батареями на 4-6 годин роботи, що є недостатнім для довготривалих блекаутів. Водночас регулярна заміна і зарядка таких батарей можуть стати значним фінансовим навантаженням для операторів. Сучасні дослідження з розробки акумуляторів підвищеної ємності та використання інноваційних матеріалів (літій-іонних і натрій-іонних елементів) можуть змінити ситуацію, проте ціна таких рішень залишається високою.

Основні переваги літійових батарей:

1. **Тривалий термін служби.** Літійові батареї мають довший життєвий цикл, який може досягати 10 років. Це значно перевищує термін служби свинцево-кислотних акумуляторів, що дозволяє операторам зменшити витрати на заміну і технічне обслуговування.

2. **Швидка зарядка.** Літійові батареї здатні заряджатися швидше, ніж традиційні акумулятори, що критично важливо при частих відключеннях і необхідності швидкого повернення в експлуатацію.

3. **Компактність та легка вага.** Літійові акумулятори мають вищу енергетичну щільність, що дозволяє зменшити розмір і вагу батарей для базових станцій. Це полегшує їх

транспортування, монтаж та обслуговування, особливо для віддалених регіонів і станцій з обмеженим простором.

4. **Підвищена енергоефективність.** Літієві батареї забезпечують стабільне живлення з мінімальними втратами енергії навіть при високих навантаженнях. Це дозволяє підтримувати роботу базових станцій з оптимальною енергоефективністю, що критично під час блекаутів.

5. **Стійкість до екстремальних умов.** Літієві батареї менш чутливі до змін температур, тому ефективніше працюють у різних кліматичних умовах. Це робить їх надійним вибором для регіонів з суворим кліматом.

Таблиця 1

Порівняння характеристик Літій-іонних та Свинцево-кислотних АКБ

Характеристика	Літій-іонні АКБ (Li-ion)	Свинцево-кислотні АКБ (Pb-acid)
Енергетична щільність	150-200 Вт·год/кг	30-50 Вт·год/кг
Кількість циклів заряд-розряду	2000–5000	300–500
Час зарядки	1–3 години	8–16 годин
Ефективність заряд-розряд	90–95%	70–80%
Температурний діапазон роботи	-20°C до +60°C	-10°C до +40°C
Вага та об'єм	Легші та компактні	Тяжчі та громіздкі
Термін служби	10–15 років	3–5 років
Вартість на одиницю енергії	Вища (залежно від типу)	Низька
Екологічність	Менше токсичних матеріалів	Високий рівень токсичних компонентів
Саморозряд	2–5% на місяць	5–20% на місяць
Здатність до глибокого розряду	До 80–90%	До 50%
Потреба у технічному обслуговуванні	Мінімальна	Регулярна (доливання води, перевірка)

Ці показники дозволяють оцінити доцільність використання того чи іншого типу батарей залежно від бюджету та специфіки застосування.

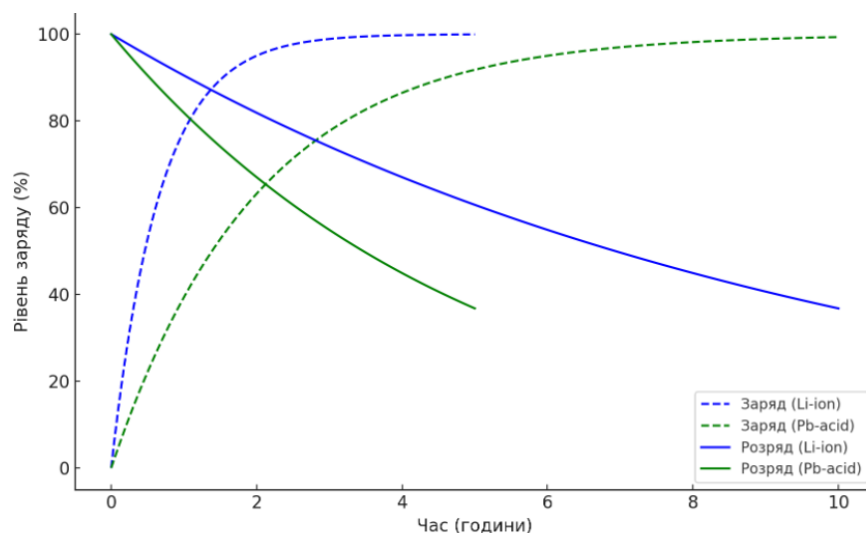


Рис.1. Порівняння заряду та розряду Li-ion та Pb-acid АКБ

- *Літій-іонні батареї (синій колір):*

Швидка зарядка та повільний розряд, що забезпечує стабільну роботу на тривалий час.

- *Свинцево-кислотні батареї (зелений колір):*

Повільна зарядка, особливо на останніх етапах, та швидший розряд, що може знижувати ефективність при тривалому використанні.

Графік демонструє, що Li-ion батареї краще підходять для задач із високими вимогами до часу зарядки та тривалості роботи без підзарядки.

Дизельні генератори забезпечують стабільне живлення базових станцій протягом тривалих періодів, але потребують регулярного технічного обслуговування та доступу до пального. Це може бути складним завданням у віддалених або важкодоступних районах, особливо під час надзвичайних ситуацій. Генератори є надійним, але недешевим рішенням, оскільки їх встановлення і підтримка потребують значних капіталовкладень. Крім того, дизельні генератори мають суттєвий вплив на навколишнє середовище через викиди CO₂, що ускладнює їх використання в умовах суворих екологічних стандартів, які все більше впроваджуються у світі.

Мобільні генератори використовуються для оперативного реагування під час кризових ситуацій. Вони можуть бути швидко доставлені до базової станції, що забезпечує тимчасове живлення до відновлення основного джерела енергії. Однак ефективність такого рішення залежить від швидкості транспортування та доступності технічного персоналу, здатного встановити і підключити генератори. Крім того, мобільні генератори потребують мобільного штабу для координації ресурсів, що створює додаткові витрати для мобільних операторів. Незважаючи на високу вартість, мобільні генератори залишаються ефективним варіантом для короткотривалих аварійних ситуацій.

Відновлювані джерела, такі як сонячні панелі, стають все більш популярними через свою екологічність і незалежність від зовнішніх ресурсів. У регіонах з високою інсоляцією сонячні панелі здатні забезпечувати живлення базових станцій тривалий час. Це є особливо корисним для віддалених станцій, де забезпечення доставки пального є проблематичним. Недоліком такого рішення є залежність від погодних умов, а також необхідність наявності додаткових систем зберігання енергії, наприклад, акумуляторів. Незважаючи на високі початкові інвестиції, сонячні панелі забезпечують стабільне живлення, що може знижувати операційні витрати у довготривалій перспективі.

Інноваційні підходи до підтримки роботи базових станцій. Інновації в енергетичній галузі відкривають нові можливості для підвищення стійкості мобільних мереж під час блекаутів. Розглянемо деякі з них.

- *Оптимізація енергоефективності*

Сучасні базові станції все частіше оснащуються інтелектуальними системами управління енергоспоживанням, які дозволяють зменшити використання електроенергії на 10-30% залежно від навантаження мережі. В умовах блекауту такі системи можуть автоматично відключати непотрібні функції, зберігаючи енергію для підтримки базової роботи станції. Це значно подовжує час роботи станцій на резервних джерелах і зменшує залежність від традиційного електропостачання.

- *Мікромережі та системи автономного живлення*

Мікромережі, що поєднують різні джерела живлення, включаючи генератори, акумулятори і сонячні панелі, стають все популярнішими для підтримки базових станцій. Вони здатні забезпечити автономну роботу станцій навіть під час тривалих відключень. Ці системи можуть автоматично перемикатися між джерелами живлення, залежно від їхньої доступності, що робить їх гнучким рішенням для забезпечення стабільного зв'язку.

- *Інтелектуальні системи моніторингу та управління*

Інтелектуальні системи моніторингу дозволяють операторам у режимі реального часу відстежувати стан резервних джерел живлення, рівень заряду акумуляторів, роботу генераторів та інші критичні параметри. Це допомагає зменшити ризик аварійних ситуацій завдяки своєчасній технічній підтримці та оптимізації використання енергії. Важливим

аспектом є можливість прогнозування потреби в енергії в умовах високого навантаження, що дає змогу операторам планувати додаткові заходи щодо забезпечення стабільності.

- *Системи довготривалого зберігання енергії для базових станцій*

Використання сучасних рішень для довготривалого зберігання енергії стає важливим напрямом для забезпечення стабільності базових станцій у періоди тривалих відключень. Зокрема, акумулятори на основі твердотільних матеріалів, котрі мають довший термін служби та кращу енергетичну щільність, можуть забезпечити роботу базових станцій на кілька днів. Їхня ефективність підвищується завдяки здатності витримувати широкий діапазон температур, що є корисним в екстремальних кліматичних умовах. Дослідження показують, що використання таких систем може значно скоротити частоту потреби у зовнішніх джерелах живлення та обслуговуванні.

- *Енергоефективні модулі для базових станцій*

Сучасні базові станції стають більш енергоефективними завдяки впровадженню нових архітектур модулів, які знижують потребу в енергії. Наприклад, активні антени з автоматичним регулюванням потужності сигналу дозволяють знижувати енерговитрати залежно від поточного навантаження мережі. Це забезпечує не тільки економію електроенергії, але й знижує ризики перегріву обладнання, продовжуючи його строк служби.

- *Водневі паливні елементи та їх перспективи в Україні*

Використання водневих паливних елементів як джерел живлення є перспективною технологією для базових станцій в Україні. Водневі елементи можуть забезпечувати тривалу автономну роботу, не вимагають складного обслуговування та є екологічно безпечними, оскільки не створюють шкідливих викидів. Крім того, можливість виробництва водню на місці за допомогою електролізу може значно підвищити енергетичну незалежність регіонів. Пілотні проекти в країнах ЄС показали високу надійність цієї технології, що дозволяє розглянути її впровадження на державному рівні.

- *Використання зв'язку "Device to device" (D2D)*

Основна ідея D2D-зв'язку полягає у створенні багатоступеневої релейної мережі, що дозволяє користувачам у зоні катастрофи комунікувати один з одним та з найближчими робочими базовими станціями через послідовну передачу даних між пристроями. Це розширює радіус дії базових станцій і мінімізує зону без покриття.

Для забезпечення ефективного функціонування D2D у таких умовах використовуються спеціальні алгоритми маршрутизації, які враховують енергетичні та обчислювальні ресурси кожного пристрою. Центральна роль відводиться мобільним базовим станціям, які виступають контролерами мережі, надаючи маршрутизаційну інформацію та оптимізуючи потоки даних.

Методологія D2D включає:

- Використання інфраструктури LTE для виділення частотних ресурсів для D2D-комунікації.
- Розробку рішень для зменшення енергоспоживання пристроїв у зоні катастроф.
- Застосування технологій управління інтерференцією, які мінімізують вплив завад на якість передачі даних.

Цей підхід забезпечує гнучке й швидке відновлення базового зв'язку, що має критичне значення для рятувальних операцій і забезпечення громадської безпеки.

- *Інтелектуальні алгоритми оптимізації енергоспоживання*

Інтелектуальні алгоритми оптимізації енергоспоживання, засновані на машинному навчанні, дозволяють передбачати пікові навантаження і регулювати споживання енергії в реальному часі. Ці алгоритми аналізують використання мережі та прогнозують необхідні потужності, автоматично розподіляючи енергоресурси між базовими станціями. Це знижує витрати на енергоспоживання, а також дозволяє більш ефективно використовувати обмежені ресурси у випадках, коли доступ до основного джерела енергії обмежений.

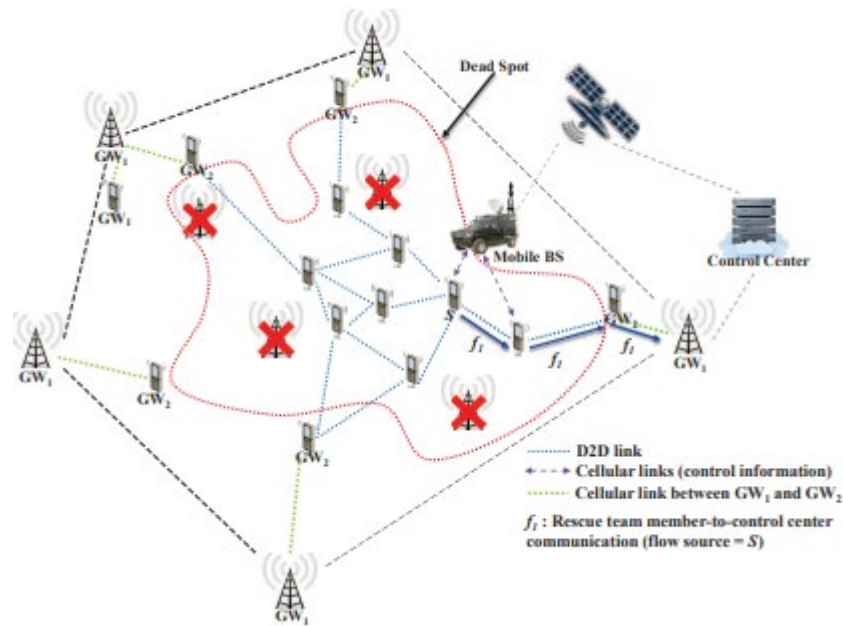


Рис. 2. Приклад запропонованої топології

- *Акумуляторні технології нового покоління (натрій-іонні та інші)*

Натрій-іонні батареї є однією з перспективних технологій для резервного живлення базових станцій. Вони відрізняються нижчою вартістю порівняно з літій-іонними акумуляторами і не потребують рідкісних металів. Дослідження показують, що натрій-іонні батареї можуть бути більш ефективними у холодному кліматі, що робить їх особливо привабливими для України. Завдяки більшому доступу до натрію ці батареї потенційно можуть бути більш стійкими до дефіциту сировини, що знижує вартість обслуговування базових станцій.

Технології зниження енергоспоживання у мережах 5G. Мережі 5G, з огляду на високу щільність базових станцій і великий обсяг даних, які обробляються, потребують більше енергії порівняно з попередніми поколіннями мереж. Проте розвиток сучасних технологій дозволяє значно зменшити енергоспоживання мереж 5G через впровадження інноваційних рішень. Ось деякі з ключових підходів до оптимізації енергоспоживання в мережах 5G:

- *Інтелектуальне управління енергоспоживанням на базових станціях*

У базових станціях 5G впроваджуються алгоритми, які дозволяють автоматично знижувати споживання енергії під час низького навантаження. Це досягається за рахунок переходу базових станцій у «сплячий режим» (sleep mode), коли вони тимчасово вимикаються або знижують активність до мінімального рівня у періоди, коли трафік невисокий (наприклад, вночі). Такий підхід дозволяє зменшити енергоспоживання до 20-30%, що особливо важливо для базових станцій, розташованих у малонаселених або віддалених районах.

- *Використання малих осередків (small cells)*

Малі осередки – це компактні базові станції з низькою потужністю, які використовуються для покриття обмежених територій з високою щільністю користувачів. Завдяки своєму розташуванню малі осередки здатні забезпечити ефективну передачу сигналу на невеликі відстані, що знижує загальне енергоспоживання мережі. Вони також зменшують навантаження на макростанції, що дозволяє значно економити енергію у міських умовах, де кількість користувачів і обсяг трафіку найбільші.

- *Алгоритми оптимізації передачі даних*

У мережах 5G використовуються алгоритми оптимізації передачі даних, які мінімізують енергоспоживання шляхом оптимального розподілу трафіку та управління інтенсивністю сигналу залежно від реальних потреб користувачів. Так, у зонах з високим навантаженням на

мережу інтелектуальні алгоритми зменшують потужність передачі в тих ділянках, де трафік знижений, перенаправляючи ресурси до більш завантажених точок. Такий підхід дозволяє знизити енергоспоживання мережі та забезпечити її стабільність.

- *Застосування енергоефективних антенних технологій*

Технології, як-от Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output), дозволяють значно підвищити енергоефективність, оскільки одночасно обслуговують більше користувачів, розподіляючи сигнал на кілька антен. Це зменшує необхідність у додаткових базових станціях і, як результат, знижує загальне енергоспоживання. Крім того, активно застосовується технологія Beamforming, яка спрямовує сигнал тільки на конкретні пристрої, а не розподіляє його рівномірно в усіх напрямках. Це не лише підвищує якість зв'язку, але й дозволяє ефективніше використовувати енергію.

- *Зелена енергетика для мереж 5G*

Враховуючи високі енергетичні потреби мереж 5G, все більше операторів переходять на відновлювані джерела енергії, такі як сонячна та вітрова енергія, для живлення базових станцій. Комбіноване використання таких джерел з акумуляторами для зберігання енергії дозволяє не лише економити кошти на електроенергії, але й зменшує викиди CO₂. Це особливо актуально для віддалених базових станцій, де доставка пального може бути ускладнена.

- *Технології глибокого навчання для моніторингу енергії*

Штучний інтелект і алгоритми глибокого навчання використовуються для моніторингу енергоспоживання в режимі реального часу. Такі системи аналізують дані про трафік, погодні умови, час доби та інші фактори, щоб оптимізувати споживання енергії. Завдяки автоматизації процесів енергоменеджменту, оператори можуть динамічно змінювати режими роботи базових станцій, забезпечуючи баланс між якістю зв'язку та економією енергії.

- *Використання мережевих функцій, розгорнутих на периферії (Edge Computing)*

Периферійні обчислення дозволяють розміщувати обробку даних ближче до кінцевого користувача, що значно знижує необхідність у централізованих обчисленнях і, як результат, зменшує енергоспоживання мережі. Цей підхід оптимізує затримку передачі даних і дозволяє більш ефективно використовувати ресурси мережі 5G.

- *Прогрес у стандартах і протоколах зв'язку*

Стандарти 5G, як-от 3GPP Release 15 і новіші, містять рекомендації та вимоги щодо енергоефективності обладнання та протоколів зв'язку. Наприклад, протокол DRX (Discontinuous Reception) дозволяє приймачам у пристроях користувачів тимчасово «засинати» для економії енергії, коли не потрібно постійного з'єднання. Це не лише економить енергію в мережі, а й сприяє подовженню часу автономної роботи мобільних пристроїв.

Досвід міжнародних практик. В багатьох країнах мобільні оператори активно розвивають власну політику енергетичної незалежності, орієнтуючись на інвестування в екологічно чисті та автономні джерела енергії.

Наприклад:

- *Японія.*

Японські оператори активно використовують вітряні турбіни і сонячні панелі для живлення віддалених базових станцій. Це знижує залежність від зовнішніх джерел енергії і забезпечує автономність станцій у критичних ситуаціях.

- *США.*

У США широко використовуються паливні комірки на основі водню, які є екологічно чистим і надійним джерелом живлення для базових станцій. Ці комірки дозволяють знизити викиди в атмосферу і забезпечити стабільне живлення під час тривалих відключень.

- *Німеччина.*

В Німеччині мобільні оператори разом з урядом фінансують програми з будівництва малих сонячних електростанцій у віддалених районах для підвищення енергетичної автономії.

- *Великобританія.*

У Великобританії активно застосовуються субсидії для операторів, що використовують екологічно чисті джерела енергії для резервного живлення базових станцій, що може бути цікавим для адаптації в Україні.

В умовах енергетичної кризи державна підтримка стає ключовою для мобільних операторів. Уряди ряду країн розробляють програми підтримки мобільних операторів, які інвестують у модернізацію своїх мереж для підвищення енергоефективності та стійкості до відключень. У таких країнах як Південна Корея, існують державні гранти, що підтримують дослідження у сфері автономного енергозабезпечення мобільних мереж, а також фінансові інструменти для полегшення переходу на відновлювані джерела енергії. Впровадження подібних ініціатив в Україні може сприяти розвитку технологій автономного енергопостачання і підвищити загальну стабільність мобільного зв'язку.

Висновки

У даній статті були розглянуті ключові аспекти забезпечення безперебійної роботи базових станцій мобільного зв'язку під час тривалих відключень електроенергії, що є особливо актуальним в умовах сучасної енергетичної нестабільності. Основні результати дослідження підтверджують, що впровадження технологій резервного живлення, таких як акумуляторні батареї, дизельні та мобільні генератори, а також альтернативних джерел, таких як сонячні панелі, є критично важливим для підтримки стабільного зв'язку. Зокрема, системи інтелектуального моніторингу та управління енергоспоживанням в мережах 5G демонструють значні переваги у зниженні витрат енергії та підвищенні ефективності роботи базових станцій.

Рекомендації щодо використання отриманих результатів включають можливість їх інтеграції в інші галузі, такі як енергетика, екологія та інформатика. Зокрема, застосування інноваційних підходів до оптимізації енергоефективності може бути корисним для розробки нових стандартів у сфері відновлюваної енергії.

Перспективи подальших досліджень в даній області включають вивчення нових технологій, які можуть ще більше підвищити автономність базових станцій, а також розробку комплексних рішень для інтеграції різних джерел живлення. Це відкриває можливості для нових досліджень в сфері сталого розвитку та енергетичної безпеки.

Наукова новизна представленого дослідження полягає в системному підході до аналізу та інтеграції різних технологій резервного живлення, що може суттєво підвищити стійкість мобільних мереж до зовнішніх впливів. Отримані результати вказують на необхідність комплексного вирішення проблеми забезпечення стабільного зв'язку в екстремальних умовах, що є важливим внеском у розвиток телекомунікаційної інфраструктури України.

Список використаної літератури:

1. Міністерство цифрової трансформації України. *Міністерство цифрової трансформації України*. URL: <https://thedigital.gov.ua>.
2. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах електронних комунікацій, радіочастотного спектра та надання послуг поштового зв'язку| URL: <https://nkek.gov.ua/>.
3. Стратегічні пріоритети НКЕК щодо розвитку регуляторного середовища у сфері електронних комунікацій на 2024-2026 роки. URL: <https://nkek.gov.ua/static-objects/nkek/uploads/public/66c/439/617/66c439617ef9e900141658.pdf>.
4. Технічні звіти і статті з енергетичної ефективності телекомунікаційної інфраструктури URL: https://nkrzi.gov.ua/images/upload/142/11109/Dodatok_do_ryishennya_NCEC_155_27032024.pdf.

5. Disaster Management and Response for Modern Cellular Networks Using Flow-Based Multi-Hop Device-to-Device Communications / M. Tanha et al. *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. 2017. P IEEE
6. Communication Technologies in Emergency Situations / A. Carreras-Coch et al. *Electronics*. 2022. Vol. 11, no. 7. P. 1155. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics11071155>.
7. Multilayer Network Optimization for 5G & 6G / A. Ramirez-Arroyo et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 204295–204308.

Автори статті

Дроголо Маріанна – студентка, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0003-7775-9437

Кириченко Роман – старший викладач, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0006-2586-2493

Домрачева Катерина – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0001-6126-7698

Authors of the article

Marianna Droholo – student, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0003-7775-9437

Kyrychenko Roman – senior lecturer, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0006-2586-2493

Kateryna Domracheva – Candidate of Science (technic), Associate Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0001-6126-7698