

ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В SMARTGRID-СИСТЕМАХ З ПРОСЬЮМЕРАМИ НА БАЗІ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Луценко І. М.¹, Федоряченко С. О.¹, Малієнко А. В.¹, Рухлова Н. Ю.¹,
Кошеленко Є. В.¹, Циган П. С.¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

²Холодов А.П.

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Проаналізовано режими роботи електричних міських ТП 6(20)/0,4 кВ. Обґрунтовано науково-технічні рішення щодо використання електромобілів у якості просьюмерів електричної енергії. Визначено потенціал впливу електромобілів на втрати електричної енергії в «розумних» електричних мережах. Надано техніко-економічне обґрунтування доцільності використання електромобілів у якості просьюмерів з позицій зниження втрат та ефективності використання обладнання мереж.

Ключові слова: просьюмер, електромобіль, V2G, втрати електричної енергії, ефективне використання обладнання.

Вступ

Для будь-якої країни однією з найважливіших галузей національної економіки, що вимагає високих показників ефективності роботи, є електроенергетична сфера. Для електроенергетики України основною проблемою є низька ефективність, викликана експлуатацією морально і фізично застарілого обладнання, рівнем автоматизації процесів тощо.

Проблемою функціонування електричних мереж є збільшені в порівнянні з розвиненими країнами рівні технологічних втрат електроенергії, викликані викладеними вище чинниками. Підвищення ефективності роботи електричних мереж України є пріоритетним напрямком діяльності, а розробка і впровадження відповідних заходів – актуальним завданням.

Втрати електричної енергії залежать від показників режимів роботи електричних мереж та характеристик споживачів, які отримують живлення та відповідно створюють графік електричних навантажень певного типу. Для ГЕН енергосистеми характерним є наявність ранкового та вечірнього піків навантаження тривалістю 6-8 годин. ГЕН є нерівномірним, а маневрена його частина покривається пилувугільними блоками теплових електростанцій, що призводить до збільшення питомих витрат палива на виробництво електричної енергії.

Знизити нерівномірність ГЕН можливо впорядкуванням ГЕН типових споживачів, наприклад комунально-побутових, спожи-

вання яких у загальному балансі досягає 30-40 % та продовжує зростати. Споживачі мають ставати регуляторами навантаження або просьюмерами, тобто у випадку наявності власних потенційних джерел «допомагати» енергосистемі покривати піки навантаження. Це можливо досягти шляхом використання нових джерел, наприклад відновлюваної енергетики, електромобілів або потужних накопичувачів.

В Україні на даний час не розвинені накопичувальні технології та вони є досить дорогими для впровадження та використання у порівнянні з тарифом на електричну енергію. Проте, є необхідність розробки заходів щодо декарбонізації економіки та впроваджувати передові технології, що сприятимуть позитивним змінам в енергетиці, екології та сталому розвитку людства.

Новий тренд в енергетиці світу полягає у створенні децентралізованих джерел з системами акумуляції електричної енергії з урахуванням можливості ефективного задоволення попиту на електричну енергію у відповідності до поточного навантаження мережі та попиту на електричну енергію. В Україні таку технологію поки не впроваджують, а розташування станцій з відновлюваними джерелами не відповідає потребам регіонів, де вони встановлюються.

Ефективним заходом для вирівнювання графіка електричних навантажень енергосистеми може стати раціональне впровадження просьюмерів навантаження за чітко визначе-

ними шаблонами із залученням, наприклад, власників електромобілів [1].

Тому доцільно дослідити та оцінити потенційний вплив електромобілів на режими роботи розподільчих мереж 6-10 кВ міст з позицій регулювання графіка споживання електричної енергії та підвищення пропускної спроможності електричної мережі та зниження втрат електричної енергії в них з оптимізацією обладнання за типорозмірною структурою та переходу до SmartGrid-систем електрозабезпечення.

Аналіз публікацій

Збільшення кількості електричних транспортних засобів робить їх важливою складовою системи електропостачання як на регіональному рівні, так і на рівні всієї країни. Розвиток електричних мереж з електромобілями, розробка і використання технологій Smart Grid для них здійснюється з урахуванням додаткових вимог і обмежень відносно режимів заряду тягових батарей автомобілів з метою забезпечення їх ефективної інтеграції в гібридну систему електропостачання [2, 3]. У роботі [4] продемонстровано потенціал розвитку децентралізованих систем енергозабезпечення для України доведено значний потенціал використання технології V2G з електромобілями у якості просьюмерів. Проаналізовано ефект підвищення ефективності роботи централізованої енергосистеми за рахунок раціонального впровадження споживачів-регуляторів на базі електромобілів з позицій екологічності та зниження вимог до маневреності. Реалізація запропонованих типових або індивідуальних шаблонів [5] використання технології V2G та залишкової ємності відпрацьованої батареї дозволяє мати економічний ефект автовласнику разом з компенсацією її прискореного зносу. Для більш повного аналізу є потреба в оцінці потенціалу впливу електромобілів в режимах їх раціонального використання на втрати енергоефективності локальних мереж населених пунктів (мікрорайони, типові споживачі тощо).

У теперішній час технологічні втрати електричної енергії в мережах 6-10 кВ знаходяться в діапазоні від 5 до 18 %, коли в Європі цей показник значно менший і досягає усього 4-8 %. Також існує значна кількість застарілого обладнання, величина зносу якого сягає 60-70 %.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ.
2017 р., % від відпуску електроенергії

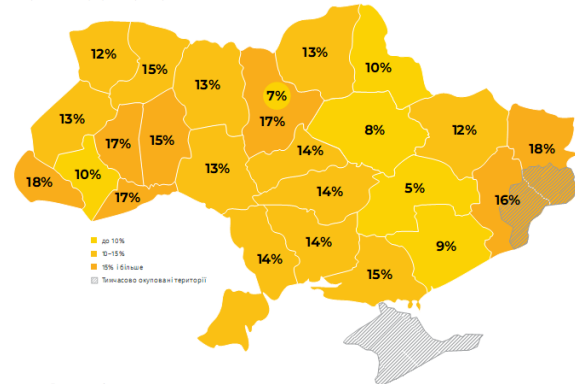


Рис. 1. Технологічні втрати електричної енергії в розподільчих мережах України

ЯКОСТІ ПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.
Протягом дня перерв в електропостачанні, 2018 р. (Україна - 2018 р.)



Рис. 1.2. Порівняльна діаграма якості електричної енергії за показником тривалості перерв в електропостачанні в Україні та Європі

Тому актуальним на даний час є пошук шляхів ефективної модернізації електромереж з урахуванням зростаючого попиту на електроенергію, що зменшити втрати електричної енергії та зменшити перерви у електропостачанні споживачів.

Більшість силових трансформаторів та ліній електропередач 6-10/0,4 кВ в експлуатації більше 40 років, що говорить про їх повний фізичний та моральний знос.

Збільшення електричного навантаження комунально-побутових споживачів значно впливає на пропуску спроможність міських електричних мереж 6-10 кВ, так як електрична мережа не завжди готова до збільшення навантаження, що призводить до виходу з ладу не тільки КЛ 6-10 кВ, а й електричного обладнання. Це призводить до значних перерв в електропостачанні та капіталовкладень.

Виходячи з даних показників зростання електричних навантажень, особливо у випадку переходу на електрообігрів, можна сказати, що пропуску спроможність міських електричних мереж 6-10 кВ повинна бути збільшена в три рази для безперервного живлення комунально-побутових споживачів.

Щільність навантаження міських електричних мереж на сьогодні за оцінками експертів складає 10-15 МВт/км², очікується подальше збільшення навантаження в період до 2025 року приблизно втричі, що викликає загрозу стабільності роботи системи електропостачання споживачів через неготовність мереж прийняти та передати це навантаження.

Проведення реконструкції або модернізації розподільчих мереж 6(10) кВ не вирішить у повній мірі проблеми зростання електричних навантажень та забезпечення прогнозованого збільшення електроспоживання міських районів. Реконструкція або модернізація не принесуть економічного ефекту, а тільки приведуть до таких самих проблем через декілька років.

Одним із радикальних заходів є переведення електричних мереж на рівень напруги 20 кВ, а відповідні технічні рішення щодо прокладання кабельних ліній застосовуються вже зараз, оскільки проектні організації закладають кабелі з рівнем напруги 24 кВ, що свідчить про наближення тенденції з переведенням мереж на підвищений рівень напруги. Проте таке рішення потребує дуже значних капіталовкладень, що на сьогодні є проблемою для енергорозподільних компаній, які не перейшли на стимулююче тарифування.

Децентралізована генерація електричної енергії є одним з перспективних шляхів вирішення проблеми дефіциту потужності в мережах, проте через стохастичність процесів виробництва електричної енергії вона може навіть поглибити проблему стійкої роботи енергосистеми країни та збільшити витрату палива на теплових електростанціях.

Раціональним заходом може стати ефективне впровадження електромобілів як активних джерел-споживачів-регуляторів електричної енергії в мережах, за рахунок чого можливо буде вирівняти ГЕН групи споживачів 0,4 кВ, а також розвантажити енергосистему в період максимуму навантаження енергосистеми за рахунок генерації електричної енергії, накопиченої в акумуляторі електромобіля.

Мета і постановка завдання

Обґрунтування підвищення енергоефективності використання електромобілів в міських електричних мережах у якості просьюмерів електричного навантаження з позицій зниження втрат в обладнанні мереж.

Основна частина дослідження

Одним з основних рушійних мотивів розвитку енергетики у період 2020 – 2040 рр. стане запобігання глобальним змінам клімату за рахунок планомірного зниження викидів парникових газів. Ключову роль в успішному вирішенні нагальних проблем енергетики, включаючи задоволення зростаючого попиту, підвищення енергоефективності та надійності енергопостачання з поліпшенням стану навколишнього середовища, визначатимуть інноваційні технології енергетики, спрямовані на розвиток «інтелектуальних» електромереж (Smart Grid), технологій «інтелектуальних» систем обліку і розрахунків (Smart Metering), управління попитом (Demand Response, DR), пристроїв акумуляування енергії та зарядки електромобілів тощо.

Розподілена генерація – найважливіший сектор світової енергетики у майбутньому. Удосконалення технологій та підвищена увага до питань екології відповідно до Паризької кліматичної угоди, вичерпність енергоресурсів, особливо вугілля та нафти, змінюватимуть структуру попиту на первинні енергоресурси та вимагатимуть перегляду традиційних підходів, принципів і механізмів функціонування енергосистеми, розроблення та впровадження нових сучасних технологій на основі ВДЕ, здатних забезпечити сталий розвиток, підвищення споживчих властивостей та ефективності використання енергії [6].

Інноваційними проектами НЕК «Укренерго», в які активно вкладають кошти стосуються, у тому числі, пілотні проекти технологій V2G (сумісна робота мереж та електромобілів), VPP (віртуальна електростанція), детальне дослідження структури споживання та Demand Response (управління споживанням) [7].

Стаціонарні системи акумуляції енергії за допомогою літій-іонних батарей для мешканців України є в більшості випадків дорогими та недоцільними до простого впровадження у якості автономного джерела живлення. Проте їх ефект може бути більш значним за умови комбінованого використання у випадку подвійного використання батареї, наприклад для умов технологій V2G та G2V електромобілів, що суттєво покращить як ефект для індивідуального користувача, так і для енергосистеми в цілому за умови стрімкого розвитку електромобілітету, для якого є всі передумови в Україні.

Економічно обґрунтовані (оптимальні) технічні втрати ΔA_{To} визначаються як різни-

ця між їх дійсним значенням $\Delta A_{\text{тех}}$ і можливим зменшенням втрат $\delta A_{\text{тех}}$ за рахунок технічних, організаційних та інших заходів:

$$\Delta A_{\text{то}} = \Delta A_{\text{тех}} - \delta A_{\text{тех}}$$

Оптимальні технічні втрати $\Delta A_{\text{то}}$ не є постійною величиною для мережі. Визначені на стадії розробки проекту вони відповідають прогнозованим навантаженням, на базі яких виконуються проектні розрахунки [8].

Значення втрат електроенергії в будь-якому елементі мережі визначається як добуток втрат потужності на тривалість часу, протягом якого вони мали місце. Причому, точність таких розрахунків залежить від характеру навантаження і його зміни протягом часу, за який визначаються втрати енергії. В лінії, яка працює з постійним навантаженням і має постійну величину втрат активної потужності ΔP протягом часу T , втрати енергії

$$\Delta A = \Delta P T$$

або

$$\Delta A = 3I^2 R T = (S / U)^2 R T$$

Техніко-економічні показники для мереж розраховують для визначеного відрізка часу, найбільш представницькими є показники за рік роботи. Тому і втрати енергії визначають для року роботи мережі, тобто 8760 годин. Якщо використовувати вище наведену формулу, то потрібно, щоб $I = \text{const}$ та $S = \text{const}$ протягом усього року. В залежності від обсягу інформації про навантаження елементів мережі за розрахунковий час для визначення річних втрат електричної енергії найчастіше використовують метод часу найбільших втрат [8]. Проте, за умови добового регулювання ГЕН за допомогою електромобілів є науково важливим дослідити вплив такого регулювання на динаміку зміни втрат електричної енергії шляхом використання методу графічного інтегрування добового ГЕН, перевагою якого є висока точність результатів, що в практиці приймається як еталонне значення втрат енергії. Зміна навантаження мереж енергосистем і споживачів веде до зміни величини втрат. Тому рівень втрат потрібно постійно контролювати.

Найбільший ефект із заходів по оптимізації схем і режимів дає регулювання добового графіка навантажень. Таке регулювання направлене на зменшення потужності навантажень в години максимуму навантажень в енергосистемі. При нинішній системі оплати

за електроенергію це зменшить вартість електроенергії для споживача. Крім того, враховуючи, що втрати залежать від величини навантаження в квадраті, то регулювання графіка навантажень в бік його вирівнювання дає значний ефект по зменшенню втрат. Регулювання добових графіків навантаження можливо різними способами. В першу чергу доцільно вирівняти графік за рахунок переведення найбільш енергоємного обладнання, працюючого періодично, з годин максимуму навантажень енергосистеми на роботу в інший час доби. До такого обладнання відносять систему відливання води з шахт, скіповий підйом на вугільних шахтах, компресорні станції, насоси подачі води, зарядні станції, групи верстатів, термічне обладнання тощо. Зрозуміло, що деякі такі заходи потребують обладнання накопичуючих пристроїв для води, вугілля, стислого повітря або створення запасів напівфабрикатів. До заходів з вирівнювання добових графіків навантажень відносять зсув за часом початку змін роботи цехів, підприємств, створення третіх (нічних) змін для найбільш енергоємного обладнання. Ці заходи по зміні режиму роботи у деякій мірі пов'язані з умовами праці робітників (проблема перевезення людей в нічну зміну, забезпечення їжею тощо), що вимагає відповідних узгоджень з профспілками та іншими організаціями. Інноваційним заходом слід вважати використання потенціалу електромобіля у якості споживача-регулятора, що також дозволить виконати вирівнювання ГЕН на рівні розподільчих мереж споживачів, при чому – вирівнювання активної складової графіка із забезпеченням ефективного енергообміну між системою та накопичувачами за допомогою двонаправлених зарядних станцій.

Для обґрунтування деяких важливих параметрів, які стосуються нерівномірності ГЕН споживачів міських електричних мережах та оцінки потенціалу їх вирівнювання, слід виконати аналіз графіків електричного навантаження (ГЕН) типових міських об'єктів. За ГЕН типових споживачів (рис. 2.3) у разі їх живлення від окремої ТП можна визначити доцільну потужність трансформаторів ТП, їх кількість з позицій ефективного використання.

У разі живлення від окремої ТП різних за характером, або декілька споживачів району доцільно скористатися наступними типовими ГЕН (рис. 2.3), у яких враховано прив'язку до найпотужнішого об'єкту.



Рис. 3. ГЕН ТП-6(10)/0,4, що живить житлові будинки з газовими плитами

Таблиця 1 – Коефіцієнти типових графіків електричного навантаження об'єктів міста

Об'єкт	Коефіцієнт нерівномірності, K_{np}	T_m , год	P_c , в.о.	$P_{ск}$, в.о.	$K_{з.г.}$	$K_{ф}$	\cos
ТП-10/0,4, (живить житлові будинки з газовими плитами)	0,25	3975,8	0,454	0,510	0,454	1,12	0,9

Згідно даних щодо типових графіків електричних навантажень об'єктів міських електричних мереж та розрахованих коефіцієнтів нерівномірності можна зробити висновки, що маневрена частина ГЕН малопотужних комунально-побутових споживачів є більш яскраво вираженою, порівняно з ГЕН енергосистеми, оскільки переважна більшість таких споживачів не використовує механізм диференційованої системи тарифікації плати за користування електричною енергією. Це спричиняє суттєвий нічний провал електроспоживання порівняно, зокрема, з ранковим та вечірнім піками. Відношення мінімального (базового) навантаження до максимального (пікового) коливається в діапазоні 60-90 % для окремих видів споживачів та складає 75% - на рівні живлячих підстанцій району з житловими будинками з електроплитами, 85 % - на рівні живлячих підстанцій району з житловими будинками з газовими плитами. Як правило, електричні навантаження на рівні підстанцій формує група струмоприймачів, найбільш потужними з яких є багатоповерхові будинки з газовими або електричними плитами. Типові ГЕН приміських ме-

реж з приватними будинками можна прийняти аналогічними, залежно від виду електрифікації об'єктів, що підключаються до ТП, або з урахуванням їх газифікації.

При зростанні кількості електромобілів в Україні до 250000 шт., можна прийняти, що кількість електромобілів складатиме близько 10 шт на 1000 чоловік, тобто сукупний заряд-розряд електромобілів може стати значним навантаженням в умовах одиничної підстанції, що може створити передумови до необхідності збільшення параметрів устаткування живлячої підстанції та її реконструкції. Упорядковане споживання-генерація енергії може сприяти навіть зниженню існуючого максимуму навантаження та більш ефективному використанню номінальних параметрів електрообладнання.

Моделювання ефективних режимів роботи електромобілів у типових мережах

Вирівнювання ГЕН споживачів електричних мереж за рахунок використання електромобілів принципово є аналогічним до загальносистемного (ГАЕС), проте в кожному окремому випадку слід визначитися зі структурою побудови та потужністю маневреного потенційного джерела.

Найбільш точним способом визначення потужності маневреного джерела є використання реальних даних з електроспоживання, що дозволить розробити шаблон використання електромобілів у конкретному випадку характерного режиму навантаження підстанції.

За умови широкого впровадження електромобілів та стійкого використання технології V2G слід враховувати при проектуванні електричної мережі даний альтернативний компенсатор активного навантаження.

Найбільш потенційними місцями для розташування станцій заряду-розряду у містах є прибудинкові автостоянки житлових районів або універсамів (ТРЦ) тощо.

Таблиця 2 – Найбільш поширені концепції взаємодії електричних автомобілів та електричної мережі

Покоління ЕА	Напрямок енергії	Взаємодія з мережею
3-е покоління	Двонаправлена G2V, V2L, V2H, V2G	Зменшення навантаження на будинок, Зменшення піку споживання електричної енергії, локального споживання
4-е покоління	Двонаправлена G2V, V2L, V2H, V2G	Допоміжні послуги (регулювання потужності резерву), розподіл мережевих послуг

Найбільш точним способом визначення потужності маневреного джерела є використання реальних даних з електроспоживання на шинах ТП-6(10)/0,4 кВ з урахуванням типових споживачів району міста, що розглядається, з подальшим моделюванням режиму використання електромобілів за розробленими шаблонами, визначенням їх кількості з позицій використання систем тарифікації юридичних осіб (станція групової зарядки) з одночасним вирівнюванням ГЕН окремої ТП, що матиме ефект для енергосистеми на національному рівні.

Використання технології V2G може стати ефективним заходом для випадків зростання навантажень в електричних мережах, оскільки воно може бути компенсовано розподіленою генерацією від децентралізованих джерел (батарей електромобілів). Режим, що має бути розглянутий та економічно обґрунтований у разі комбінованого використання електромобіля за часом орієнтовно можна розподілити наступним чином [4]:

Таблиця 3 – Шаблон використання електромобіля на станціях-стоянках групового заряду-розряду (ІОО)

7:00 – 8:00	режим автомобіля
Ранковий пік навантажень енергосистеми	режим генератора
Денний напівпік	режим споживача
17:00 – 18:00	режим автомобіля
Вечірній пік навантажень енергосистеми	режим генератора
Нічний провал	режим споживача

Автомобілі знаходяться на громадській стоянці (паркінгу), яка може служити для прийому електроенергії і передачі її в мережу, а також для заряду електромобілів.

Переваги регулювання навантаження при такій схемі генерації є зниження навантажувальних втрат в трансформаторах і лініях електропередачі середньої і високої напруги.

З огляду на той факт, що прибудинкові ТП-6 (10) /0,4 кВ розміщуються в центрах електричних навантажень, станція заряду-розряду для задоволення оптимальних техніко-економічних показників роботи повинна розміщуватися максимально близько до трансформаторної підстанції, що сприятиме мінімізації втрат електричної енергії в живлячих кабелях, задовільним показниками якості електричної енергії за критерієм відхилення напруги, а також мінімальним капіталовкладенням в систему зовнішнього електропостачання об'єкта. Використання станції та її потужність на етапі розвитку альтерна-

тивних активних компенсаторів обмежується маневреною частиною ГЕН ТП, з урахуванням рівномірного заряджання батарей електромобілів в періоди нічного провалу.

Мета регулювання – оцінити потенціал зниження втрат в трансформаторах підстанцій за рахунок вирівнювання ГЕН споживачів за допомогою електромобілів.

Зважаючи на вище наведені викладки, виконаємо моделювання реалізації технології V2G/G2V для типового житлового району міської забудови (ТП, що живить район з багатоповерховими будинками з газовими плитами) з оцінкою впливу електромобілів на режим роботи мережі та зміну показників ГЕН.

Допущення:

- моделювання проводиться для однакових електромобілів типу Nissan Leaf;
- електромобілі мають однаковий типовий шаблон використання, наведений у табл. 3;
- використання електромобіля у якості активного споживача-регулятора-генератора проходить в режимі заряджання/розряджання трифазною станцією (за основу взято потужність трифазну потужність 6,6 кВт) з метою зниження негативного впливу на прискорену деградацію тягової батареї;

Обмеження:

- при моделюванні визначається ефективна кількість електромобілів для покриття маневреної частини типового ГЕН з прив'язкою до можливих варіантів потужності трансформторів живлячої підстанції (250, 400, 630, 1000 кВА);

- основна мета регулювання – рівномірний ГЕН ТП, що обслуговує типовий район зі споживачами (багатоповерхові забудови до 10-ти поверхів) та оцінка динаміки втрат електричної енергії в трансформаторах.

Результати моделювання щодо вирівнювання ГЕН типових споживачів представлено на рис. 4-5.

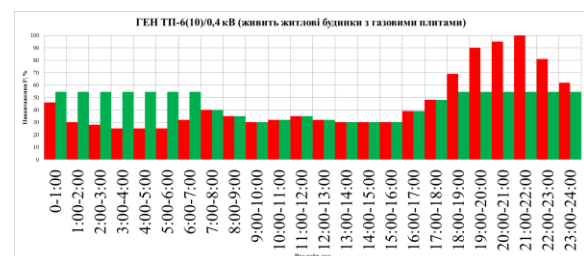


Рис. 4 – Порівняльний ГЕН ТП-6(10)/0,4 кВ для житлового району (Тип1) міста із забудовою до 10 поверхів («червоний» - вихідний ГЕН; «зелений» - при використанні електромобілів)

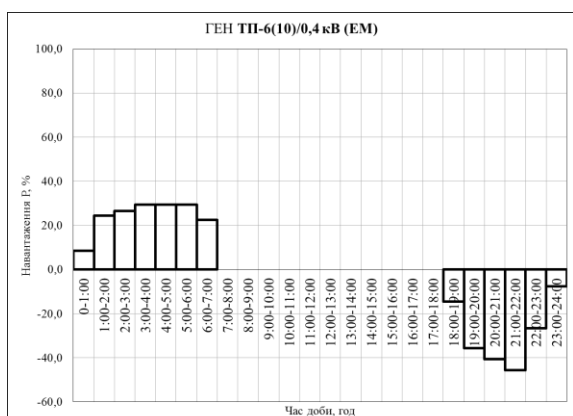


Рис. 5. Режим використання електромобіля у якості активного споживача-регулятора (Тип 1)

Таблиця 4 – Порівняння показників ГЕН з урахуванням розроблених заходів

Житловий район Тип 1						
	Кнр	Тм, год	Рс, в.о.	Рск, в.о.	Кзг	Км
Без урахування ЕМ	0,25	3975,8	0,454	0,510	0,454	2,20
З урахуванням ЕМ	0,55	7303	0,45	0,47	0,83	1,2

Змодельовані графіки електричних навантажень та положення щодо визначення втрат електричної енергії за методом інтегрування добового ГЕН дозволяють виконати оцінку відповідних втрат електричної енергії в силових трансформаторах ТП, що розглядаються, потужністю від 250 кВА до 1600 кВА.

Наведемо у таблиці 5 паспортні втрати для трансформаторів типу ТМ-250(1600)/6-10/0,4 з діапазоном потужностей, що розглядається

Враховуючи технічні характеристики трансформаторів, знайдемо відповідну динаміку зміни втрат електричної енергії для типового

району міста зі звичайним та регульованим ГЕН.

Таблиця 5 – Технічні характеристики трансформаторів типу ТМ

Серія	Позначення типорозміру	Номинальна потужність трансформатора $S_{ном.т}$, кВ·А	Втрати	
			Рхх, кВт	Ркз, кВт
ТМ	ТМ-100	100	0,305	1,97
	ТМ-160	160	0,41	2,65
	ТМ-250	250	0,55	3,7
	ТМ-400	400	0,83	5,5
	ТМ-630	630	1,05	7,6
	ТМ-1000	1000	1,55	10,8
	ТМ-1600	1600	2,05	16
	ТМ-2500	2500	3,35	26,3

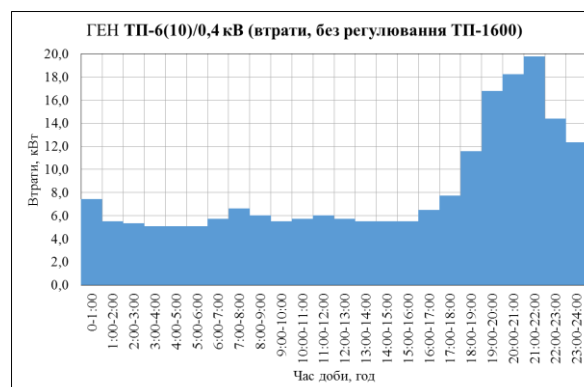


Рис. 6. Графік зміни втрат електричної енергії в трансформаторах без регулювання навантаження

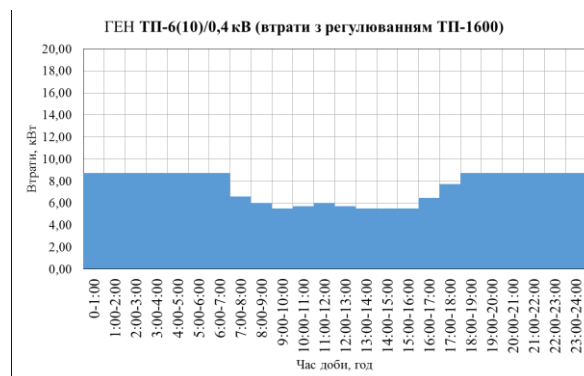


Рис. 7. Графік зміни втрат електричної енергії в трансформаторах при регулюванні навантаження за допомогою електромобілів

Таблиця 6 – Порівняльна таблиця річних втрат електричної енергії в трансформаторах без регулювання ГЕН (1) та з регулюванням (2)

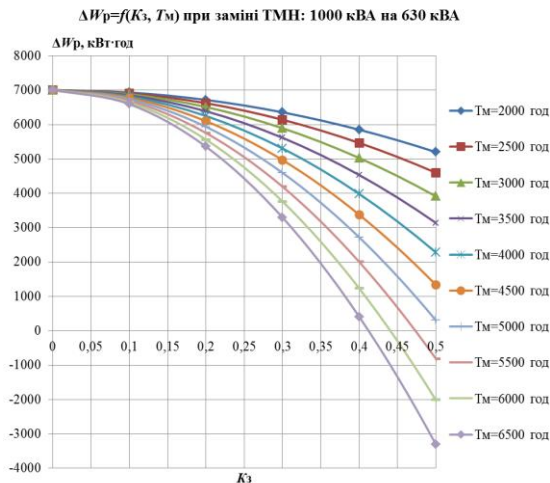
ТП	$\Delta W_{акт.p1}$, кВтгод	$\Delta W_{акт.p2}$, кВтгод	$\Delta W_{акт.p1-2}$, кВтгод	$\Delta W_{акт.p1-2}$, %
ТП 2x250 кВА	17909,5	16524,0	1385,5	7,74
ТП 2x400 кВА	26840,1	24780,5	2059,6	7,67
ТП 2x630 кВА	35390,3	32544,3	2846,0	8,04
ТП 2x1000 кВА	51305,8	47261,5	4044,3	7,88
ТП 2x1600 кВА	72506,9	65701,9	6805,0	9,39

Проаналізуємо динаміку зміни втрат електричної енергії при регулюванні ГЕН за допомогою електромобілів та застосуванні трансформатора меншого типорозміру (250 замість 400 кВА, 400/630, 630/1000, 1000/1600 кВА).

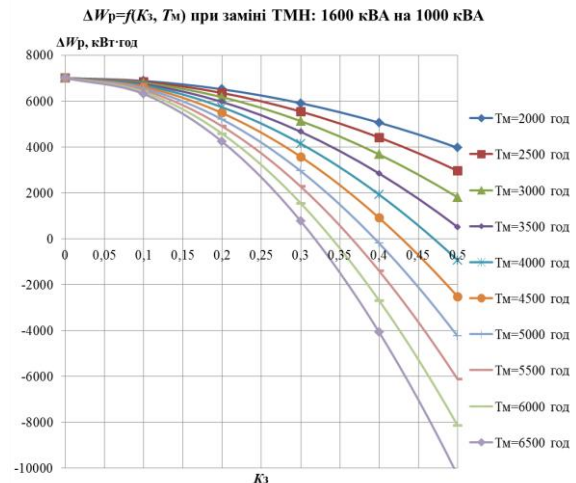
Враховуємо, що завантаження трансформатора меншого типорозміру зміниться пропорційно відношенню номінальних потужностей трансформаторів, що складе близько 1,6, враховуючи крок дискретизації потужностей стандартного номенклатурного ряду трансформаторного устаткування.

Таблиця 7 – Порівняльна таблиця річних втрат електричної енергії в трансформаторах суміжних типорозмірів

	Заміна Т2 на Т1 (вихідний ГЕН – без регулювання)		Заміна Т2 на Т1 (вихідний ГЕН – з регулюванням)	
	$\Delta W_{\text{акт.р.Т2-Т1}}$, кВтгод	Вартість втрат, тис. грн/рік	$\Delta W_{\text{акт.р.Т2-Т1}}$, кВтгод	Вартість втрат, тис. грн/рік
400/250	-429	-0,78	-2489	-4,50
630/400	-4550	-8,24	-7396	-13,39
1000/630	-2737	-4,95	-6782	-12,27
1600/1000	-6119	-11,08	-12924	-23,39



а)



б)

Рис. 8. Криві залежностей динаміки зміни втрат електричної енергії для трансформаторів суміжних типорозмірів при зміні параметрів ГЕН

Вартість втрат електричної енергії прийнята на рівні 1,8 грн/кВт·год. Таким чином, бачимо, що за вартістю втрат електричної енергії прийняття трансформаторів меншого типорозміру викликає від'ємне значення різниці, оскільки страти підвищуються за рахунок навантажувальної їх складової. Проте слід додатково порівняти вартість суміжних типорозмірів трансформаторів і потім зробити остаточні висновки, через скільки років за вартістю втрат капіталовкладення стануть рівними. Зниження річного споживання електричної енергії за рахунок зменшення втрат потужності в конструктивних елементах трансформатора:

$$\Delta W_{p,2-1} = (\Delta P_{xx,2-1} T_p + \Delta P_{k3,2-1} \tau_{нб}) \cdot 10^{-3}, \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Слід додатково враховувати, що «навантажувальні» втрати електричної енергії залежать від двох параметрів – K_3 і T_m ($\tau_{нб}$).

З наведених графіків для суміжних типорозмірів трансформаторів можна попередньо визначити доцільність їх заміни та відповідну ефективність такого заходу за річними втратами електричної енергії. Від'ємні значення втрат електричної енергії свідчать про недоцільність такого заходу, але розглядати їх слід, порівнюючи з різницею у вартості трансформаторів суміжних типорозмірів. Різниця втрат електричної енергії зростає зі зростанням числа годин використання максимального навантаження, тобто при вирівнюванні графіка електричних навантажень.

Мінімальна різниця при максимальному значенні T_m і K_3 становить 3000-50000 кВт·год. Для об'єктивної оцінки слід враховувати тариф на електроенергію (поточний і перспективний прогноз), вартість трансформаторів, що розглядаються при оптимізації, а також регламентований строк служби обладнання.

Приймаючи вартість закупівлі втрат електричної енергії на рівні 1,8 грн/кВт·год, можна визначити економічний ефект для підприємства за рахунок зниження втрат електричної енергії.

Таблиця 8 – Зниження вартості річних втрат електричної енергії в трансформаторах за умови регулювання ГЕН

ТП	$\Delta W_{\text{акт.р1-2}}$, кВт·год	Закупівельний тариф на втрати ЕЕ, грн/кВт·год	Зниження вартості втрат, тис. грн/рік
ТП 2х250 кВА	1385,5	1,8	2,51
ТП 2х400 кВА	2059,6		3,73
ТП 2х630 кВА	2846,0		5,15
ТП 2х1000 кВА	4044,3		7,32
ТП 2х1600 кВА	6805,0		12,32

Таблиця 9 – Зниження вартості річних втрат електричної енергії в трансформаторах за умови регулювання ГЕН та застосування меншого типорозміру

ТП	$\Delta W_{\text{акт.рТ2-Т1}}$, кВт·год	Закупівельний тариф на втрати ЕЕ, грн/кВт·год	Зниження вартості втрат, тис. грн/рік $\Delta P_{\text{акт.р-Т2-Т1}}$
ТП 2х250/2х400 кВА	-429	1,81	-0,78
ТП 2х400/2х630 кВА	-4550		-8,24
ТП 2х630/2х1000 кВА	-2737		-4,95
ТП 2х1000/2х1600 кВА	-6119		-11,08

Зважаючи на той факт, що різниця вартості втрат електричної енергії є від'ємною, необхідно додатково проаналізувати економічний ефект, який досягається на різниці у вартості безпосередньо трансформаторів суміжних типорозмірів та порівняти відпові-

Відзначимо, що аспект деградації АКБ електромобілів в даній роботі не розглядається, акцент зроблено на потенціал зниження втрат електричної енергії в мережах та оптимізації застосування електрообладнання мереж.

У табл. 9 наведемо результати аналогічних розрахунків з урахуванням заміни трансформаторів на ступінь меншим типорозміром.

дні додаткові втрати з терміном служби, протягом якого вони досягнуть рівності капіталовкладень. Питома вартість 1 кВА трансформаторної потужності приймається на рівні 0,75 тис. грн/кВА.

Таблиця 10 – Порівняльна таблиця капіталовкладень в обладнання та вартості втрат енергії при типорозмірній оптимізації трансформаторів

Серія	$S_{\text{ном.т}}$	Капіталовкладення в трансформатори, тис. грн (2-трансформаторна ТП)		Різниця вартості обл., $\Delta K_{\text{Т1-Т2}}$	Додаткова вартість втрат, $\Delta P_{\text{акт.р-Т2-Т1}}$	Строк зрівняння вартості втрат і вартості обл.
	кВА	Варіант 1 Т2	Варіант 2 Т1	тис. грн	кВт·год/рік	рік
ТМ	250	375	240	135	-0,78	173
	400	600	375	225	-8,24	27
	630	945	600	345	-4,95	69,7
	1000	1500	945	555	-11,08	50,5
	1600	2400	1500	900		

Як видно з проведених розрахунків за втратами електричної енергії за умови застосування трансформаторів менших типорозмірів строки, коли плата за додаткові втрати зрівняється з початковими капіталовкладеннями складуть від 27 до 173 років, що перевищує регламентовані строки експлуатації трансформаторного обладнання. Тому типорозмірна оптимізація за умови регулювання ГЕН є доцільною.

Висновки

Проаналізовано потенціал вирівнювання добового графіка електричних навантажень типового району споживачів міських електричних мереж з позицій зниження втрат електричної енергії при регулюванні ГЕН зі сторони 0,4 кВ за допомогою електромобілів.

В результаті моделювання та проведених розрахунків режимів використання електромобілів за смарт-технологіями V2G/G2V доведено можливість знизити розрахунковий максимум навантаження електромережі на 45%, або в 1,8 рази, що створює передумови до ефективного вибору устаткування мереж та його подальшого використання у відповідності до номінальних параметрів. Отримані результати представляють наукову новизну, оскільки використання запропонованих принципів дозволяє знизити втрати електричної енергії в електричних мережах на 7-10 % у порівнянні з існуючими, підвищити пропускну спроможність електричних мереж у випадку, що розглядається на 45 %, що сприятиме зниженню капіталовкладень в електрообладнання мереж.

Економічний ефект, який спостерігатиметься в електричних мережах щодо зниження втрат електричної енергії при вирівнюванні ГЕН є позитивним при виконанні регулювання та полягає у зменшенні первинних капіталовкладень в обладнання, а підвищені втрати при цьому лише дещо знижують даний ефект, проте не нівелюють його, оскільки порівнюючи капіталовкладення і втрати на періоді регламентованої експлуатації трансформаторного обладнання, економічний ефект залишається додатнім.

Література

1. Perspectives of load management in energy system with help of electric cars / Yu.V. Khatskevych, I.M. Lutsenko, A.V. Rukhlov // Scientific Bulletin of the National Mining University. – 2017. – Vol. 5. – pp. 82 – 88.
2. Hu Z., Song Y., Xu, Z. Hierarchical Coordinated Control-Strategies for Plug-in Electric Vehicle

Charging // Plug-In Electric Vehicles in Smart Grid: Charging Strategies. – 2014. – Chapter 3. – Springer. – pp.55-87.

3. Vardakas J.S., Zorba N., Verikoukis C.V. A Survey on Demand Response Programs in Smart Grids: Pricing Methods and Optimization Algorithms. // IEEE Communication Surveys and Tutorials. – 2013. – pp. 1-27.
4. Луценко І.М., Циган П.С. Технічні та економічні аспекти використання електромобілів в електричних мережах України// Вісник КрНУ. – Кременчук: 2017. – Вип. 6/2017 (107) . – С. 21-30. – Режим доступу: http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2017_6_21-30_6-2017.pdf –
5. Lutsenko I.M., Fedoriachenko S.O., Beshta O.O., Vesela M.A., Koshelenko I.V. Estimation of the potential impact of electric vehicles on the distribution network's operation modes. Mechanics, Materials Science & Engineering, Vol. 8 2017. Режим доступу: <https://mmse.xyz/en/estimation-of-the-potential-impact-of-electric-vehicles-on-the-distribution-networks-operation-modes/> DOI [10.2412/mmse.40.52.3056](https://doi.org/10.2412/mmse.40.52.3056).
6. Стан і перспективи розвитку технологій «інтелектуальних» електромереж, управління попитом та систем режимного управління в умовах розвитку поновлюваних джерел енергії у зарубіжній енергетичній сфері. Київ – 03/2018. Режим доступу: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/04/1.-Stan-rozvytku-smart-grid.pdf>
7. ДП НЕК «Укренерго». ІТ-ПРОЕКТИ. Режим доступу: <https://ua.energy/diyalnist/projects/spilni-proekty-z-mfi/#1538032249035-96c4bd2a-d9fc1cf7-ff2a>
8. Кігель Г.А., Півняк Г.Г. Електричні мережі систем електропостачання: Навчальний посібник. Видання 2-е, перероблене та доповнене. – Дніпропетровськ: ДВНЗ “Національний гірничий університет”, 2011.– 325 с.

References

1. Perspectives of load management in energy system with help of electric cars / Yu.V. Khatskevych, I.M. Lutsenko, A.V. Rukhlov // Scientific Bulletin of the National Mining University. – 2017. – Vol. 5. – pp. 82 – 88.
2. Hu Z., Song Y., Xu, Z. Hierarchical Coordinated Control-Strategies for Plug-in Electric Vehicle Charging // Plug-In Electric Vehicles in Smart Grid: Charging Strategies. – 2014. – Chapter 3. – Springer. – pp.55-87.
3. Vardakas J.S., Zorba N., Verikoukis C.V. A Survey on Demand Response Programs in Smart Grids: Pricing Methods and Optimization Algorithms. // IEEE Communication Surveys and Tutorials. – 2013. – pp. 1-27.
4. Lutsenko, I.M. and Tsyhan, P.S. (2017), “Technical and economic aspects of the electric vehicles use in power networks of Ukraine”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi Na-*

- tional University, vol. 6, no. 107, pp. – Available at: http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2017_6_21-30_6-2017.pdf
5. Lutsenko I.M., Fedoriachenko S.O., Beshta O.O., Vesela M.A., Koshelenko I.V. Estimation of the potential impact of electric vehicles on the distribution network's operation modes. Mechanics, Materials Science & Engineering, Vol. 8 2017. Режим доступу: <https://mmse.xyz/en/estimation-of-the-potential-impact-of-electric-vehicles-on-the-distribution-networks-operation-modes/> DOI 10.2412/mmse.40.52.3056.
 6. Status and prospects of development of technologies of "intelligent" power grids, demand management and regime management systems in the conditions of development of renewable energy sources in the foreign energy sphere. Kyiv - 03/2018. Available at: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/04/1.-Stan-rozvytku-smart-grid.pdf>
 7. SC Ukrenergo. IT PROJECTS. Available at: <https://ua.energy/diyalnist/projects/spilni-proekty-z-mfi/#1538032249035-96c4bd2a-d9fc1cf7-ff2a>
 8. Kigel H.A., Pivnyak H.H. Electrical grids of power supply systems: Training manual. 2nd edition, revised and supplemented. - Dnipropetrovsk: SHEI "National Mining University", 2011.– 325 p.

Луценко І.М., к.т.н., професор,
Федоряченко С.О., Малієнко А.В.,
Рухлова Н.Ю., к.т.н., доценти
Кошеленко Є.В., асистент,
Циган П.С., аспірант,

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро,

Lutsenko.i.m@nmu.one

Холодов А.П., к.т.н., доцент

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, м. Харків, тел. (057)707-36-58,

Estimation of the potential of energy efficiency increase in SMARTGRID systems with prosumers based on electric vehicles

Abstract. *The modes of operation of power transformer substations 6 (20)/0.4 kV are analyzed. Scientific and technical solutions for the use of electric vehicles as prosumers of electric energy are substantiated. The potential influence of electric cars on electricity losses in "smart" electric networks is determined. Feasibility study of expediency of using electric mobiles as prosumers from the standpoint of loss reduction and efficiency of network equipment use is given. Quantitative indicators of the potential of equalization of the daily schedule of electric loads of the typical area of consumers of city electric networks are determined. The main indicator is the reduction of electricity losses in transformers by 7-10% compared with the existing ones when regulating the mode from the side of 0.4 kV with help of electric vehicles. Additionally, the possibility of increasing the capacity of electrical networks up to 45% identified.*

Key words: *prosumer, electric vehicle, V2G, power losses, efficient use of equipment.*

Lutsenko I.M., Ph.D., Professor,
Fedoriachenko S.O., Malienko A.V.,
Rukhlova N.Yu., Ph.D., Associate Professors,
Koshelenko I.V., Assistant,
Tsyhan P.S., post-graduate student, Dnipro University of Technology, ave. Dmytro Yavornytsky, 19, 49005, Dnipro,
Lutsenko.i.m@nmu.one
Kholodov A.P., Ph.D., Associate Professor
Kharkiv National Automobile and Road University, 25 Yaroslava Mudroho, Kharkiv, 61002, Ukraine, +380577073658, lai@khadi.kharkov.ua