

УДК 621.31

Віталій Бабак¹, д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0002-9066-4307>

Євген Нікітін^{1,2*}, д-р техн. наук, ст. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0002-0173-6461>

Олександр Тесленко¹, канд. техн. наук, ст. досл., <https://orcid.org/0000-0002-3772-5991>

¹Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна;

²Інститут газу НАН України, вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, 03113, Україна

*Автор-кореспондент: nikitin_ee@ukr.net

ЦІЛІСНИЙ ПІДХІД ДО СИСТЕМНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ, ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА КОМУНАЛЬНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Анотація. Розглянуто потенціал цілісного підходу до електроенергетичної системи, централізованого теплопостачання та комунальної інфраструктури населених пунктів. Запропонований цілісний підхід реалізується на місцевому, регіональному та національному рівні. Проаналізовано комплекс інвестиційних проєктів, за рахунок яких може бути реалізовано цей потенціал, включно з когенерацією, тепловим акумулюванням, електроопаленням. Особлива увага приділяється синергетичним та мультиефективним проєктам. Розглядається поняття стійкості енергетичної системи. Запропоновано принципово нову структуру та основи функціонування електротеплової системи, яка об'єднує національну енергетичну систему та системи централізованого теплопостачання шляхом електрифікації теплопостачання через використання енергії автономних мінливих відновлюваних джерел енергії та потужностей традиційної генерації електростанцій в електричних котлах, які не потребують нормованих показників якості електроенергії. Простежується взаємозв'язок між енергетичними секторами, будівлями та секторами комунальної інфраструктури. Проведено кількісні оцінки деяких проєктів на прикладі об'єднаної енергетичної системи України та систем централізованого теплопостачання. Запропоновано напрями удосконалення національної законодавчої та нормативно-методичної бази для реалізації цілісного підходу до електроенергетики, централізованого теплопостачання та комунальної інфраструктури населених пунктів.

Ключові слова: об'єднана енергетична система, централізоване теплопостачання, комунальна інфраструктура, синергія, мультиефективність.

1. Вступ

Традиційна енергетика, яка остаточно сформувалась у другій половині минулого століття, базується переважно на використанні викопного палива із застосуванням технологій його спалювання або ядерного перетворення. Така енергетика вивела людство на певний рівень цивілізаційного розвитку. Однак одночасно сформувалось розуміння того, що подальший інтенсивний розвиток саме такої енергетики є занадто шкідливим для навколишнього середовища та призводить до негативних кліматичних змін в планетарному масштабі.

Сильною рисою існуючої традиційної енергетики є високий рівень незалежності енергопостачання від впливу кліматичних, просторових та часових факторів, що утворює її здатність безперервно задовольняти енергетичні потреби споживачів в необхідних обсягах. Однак така

енергетика має переважно фрагментарний характер: виробники та споживачі енергії, різні види енергоносіїв та окремі енергетичні системи розглядаються умовно незалежними один від одного.

Сучасна парадигма кліматично нейтрального розвитку енергетики шляхом відмови від використання викопного вуглецевмісного палива, поступовий перманентний перехід до використання мінливої енергії сонця, вітру та навколишнього середовища обумовлює необхідність перегляду звичних властивостей традиційної енергетики та актуалізує концепцію інтеграції окремих енергетичних систем, цілісного підходу до структурної трансформації енергетики та забезпечення умов для більш стійкого функціонування генерації від відновлюваних джерел.

Завдання інтеграції енергетичних систем є дуже широким і багатошаровим. Воно виходить за межі безпосередньо енергетичного сектору і глибоко інтегрується в інші сектори економіки: промисловість, сільське господарство, міську інфраструктуру тощо. Це завдання стосується не тільки технологічних, техніко-економічних та екологічних питань, а також потребує вдосконалення нормативно-правової бази та сучасного рівня управління організаційними структурами різних форм власності та адміністративного підпорядкування.

Європейська стратегія енергетичної інтеграції [1], прийнята у 2020 році, орієнтована на цілісний розгляд усіх енергетичних секторів та споживачів енергії. Ця стратегія включає такі основні положення: планування та функціонування енергетичної системи «в цілому» в рамках багатьох енергоносіїв, інфраструктур та секторів споживання; споживачі відіграють активну роль у постачанні енергії, наприклад обмінюються теплом у розумних системах централізованого тепlopостачання (СЦТ) або постачають електроенергію, яку вони виробляють; невідворотні потоки відходів використовуються повторно для енергетичних цілей; вироблення енергії з біовідходів або на очисних спорудах; використання відновлюваного та низьковуглецевого палива, включаючи водень; спільне вироблення електричної та теплової енергії; більша пряма електрифікація секторів кінцевого споживання, у тому числі електричного обігріву; використання теплових насосів для обігріву приміщень; швидке зростання та конкурентоспроможність виробництва електроенергії з відновлюваних джерел; синергія між електроенергетичним, газовим та кінцевим секторами; «вертикально» децентралізовані виробничі підрозділи та споживачі роблять активний внесок у загальний баланс та гнучкість енергосистеми.

Стратегія ЄС теплозабезпечення та охолодження [2], прийнята у 2016 році, є основою для інтеграції систем ефективного опалення та охолодження в енергетичну політику ЄС. Основна увага зосереджена на запобіганні марного витоку енергії з будівель, підвищенню ефективності та стійкості систем обігріву та охолодження, підтримці ефективності в промисловості і використанні переваг інтеграції обігріву та охолодження в систему електропостачання.

Нова дорожня карта ЄС щодо розвитку сектору теплозабезпечення та охолодження до 2050 року (Heat Roadmap Europe 2050) формулює основні положення розвитку СЦТ в європейських країнах [3]:

- синергія поєднання енергозбереження з розширенням СЦТ шляхом переходу на низькотемпературні режими теплоносія, забезпечення низьких втрат теплоти в теплових мережах (ТМ), інтелектуального контролю і управління обігрівом будівель та передавальною тепловою потужністю ТМ;

- можливість використання відновлюваного та вторинного (скидного) тепла з низькотемпературних джерел теплоти від теплоелектроцентралей (ТЕЦ), спалювання відходів, використання відходів тепла від процесів у промисловості та комерційних будівлях, сонячних теплових установок з добовим та сезонним зберіганням теплоти;

- можливість бути невід’ємною частиною розумних енергетичних мереж, включно з регулюванням ТЕЦ за допомогою теплового акумулювання, інтеграції потужних промислових теплових насосів (ТН) у системи ТЕЦ, залучення інтегрованих ТЕЦ до забезпечення стабілізації електричних мереж та підтримки балансу між споживанням та генерацією енергії;

–здатність забезпечити належну структуру планування, витрат та мотивації, включно з комплексними процедурами планування стратегічної інфраструктури, використання геоінформаційних систем, встановлення тарифів та граничних втрат.

Наявна в Україні ситуація стисло характеризується тим, що проблеми підвищення балансуєчої спроможності (гнучкості) об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) країни та модернізація застарілих СЦТ не розглядаються в комплексі. Відсутні плани, програми, нормативно-правові та нормативно-методичні документи, техніко-економічні оцінки, спрямовані на комплексне вирішення цих двох важливих проблем. Концепція цілісного розгляду електроенергетики і сектору централізованого теплопостачання потребує узагальнення відповідних організаційно-технологічних заходів, напрацьованих у розвинутих країнах світу з високою питомою часткою енергетики з відновлюваних джерел, проведення техніко-економічних досліджень можливостей їх використання на ТЕЦ та СЦТ України, аналізу нормативно-правових питань, пов'язаних із залученням ТЕЦ та СЦТ до надання додаткових послуг з балансування генерації – споживання (маневреної роботи) в умовах ринку електроенергії. Саме тому розробка основних положень цілісного підходу до системної трансформації електроенергетики, централізованого теплопостачання та комунальної інфраструктури в Україні є актуальним напрямом наукових досліджень.

2. Об'єкти, предмет та мета дослідження

Об'єктами дослідження є електроенергетика, централізоване теплопостачання та міська комунальна інфраструктура, включно із будівлями та спорудами. Ці об'єкти доцільно розглядати у національному, регіональному та(або) місцевому масштабі. У цьому дослідженні вони розглядаються як велика сукупність систем (система систем), що містить такі взаємодіючі системні складові, як об'єднана енергетична система України, системи централізованого теплопостачання населених пунктів, а також комунальна інфраструктура населених пунктів (КІМ) України.

Предметом дослідження є синергія та мультиефективність процесів трансформації цієї сукупності систем з метою покращення показників енергетичної ефективності, екологічної нейтральності (насамперед декарбонізації) та стійкості функціонування шляхом реалізації інноваційних екологоенергетичних проєктів.

Метою дослідження є визначення основних технічних, нормативно-правових та нормативно-методичних напрямів практичної реалізації синергії та мультиефективності процесів системної трансформації секторів, що розглядаються.

3. Вихідні положення та методологія

В основу методології дослідження запропоновані такі послідовні кроки: загальний аналіз характеристик об'єктів дослідження за показниками, що дозволяють визначити потенціал їх енергетичної взаємодії; виявлення релевантних інвестиційних проєктів; аналіз законодавчої та нормативно-методичної бази, що стосується реалізації цих проєктів. ОЕС України, СЦТ та КІМ порівнюються між собою за структурою технічних засобів, функціональним призначенням, обсягами виробництва та споживання енергії.

У дослідженні використовуються поняття синергії та мультиефективності. Синергія – це ефект сукупної взаємодії декількох факторів (процесів, проєктів), який перевищує просту суму дії кожного з них окремо. Відповідно, синергетичні проєкти – це такі проєкти, сумарний ефект яких перевищує ефект відокремленої реалізації кожного з них. Поряд із синергією кількох проєктів слід розглядати мультиефективні проєкти. Мультиефективним називатимемо проєкт, результатом реалізації якого є поліпшення кількох цільових показників або одного показника у кількох окремих секторах. Показники енергетичної ефективності та екологічної нейтральності (декарбонізації) є загальновизначеними та не потребують додаткових пояснень.

Під стійкістю розуміється здатність енергетичної системи або сукупності систем зберігати працездатний або частково працездатний стан при виникненні зовнішніх впливів, а саме:

- порушення балансу генерації і споживання електричної енергії, пов'язані з нерівномірністю добового графіка споживання електроенергії;
- порушення балансу генерації і споживання електричної енергії, обумовлені мінливим (стохастичним) характером сонячної та вітрової електричної генерації, частка якої в загальному виробництві електроенергії в подальшій перспективі буде невпинно зростати;
- порушення балансу генерації та споживання теплової енергії. Зараз цей фактор не є настільки критичним як для електроенергії, але із зростанням частки мінливої сонячної теплової генерації в загальному виробництві теплової енергії вплив цього фактора буде зростати;
- аварійне (випадкове) або навмисне (цілеспрямоване) руйнування об'єктів генерації, транспортування та розподілення електричної та теплової енергії;
- тимчасове переривання або недостатнє забезпечення джерел електро- та тепlopостачання паливом в умовах домінування у якості палива природного газу.

4. Результати дослідження

Україна має потужну електроенергетичну систему та СЦТ. Відповідно до Енергетичної стратегії України до 2050 року [4] домінуючим джерелом електричної енергії в ОЕС України є атомні електричні станції (АЕС), призначені для забезпечення базового навантаження в загальній енергосистемі. Крім того, Енергетична стратегія України передбачає стрімкий та переважаючий розвиток вітрової та сонячної електричної генерації, що утворює необхідність мати відповідні маневрові електрогенеруючі потужності для балансування мінливого характеру генерації від цих відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Наявні вугільні теплові електростанції (ТЕС) України, які використовуються сьогодні як балансуєчі електрогенеруючі потужності та зазнають нищівної руйнації російським агресором, суттєво фізично зношені та технологічно застарілі, мають значне перевищення нормативного терміну експлуатації, не проектувались для експлуатації в маневрових режимах, не відповідають сучасним екологічним вимогам та не можуть розглядатися як перспективний напрям подальшого забезпечення балансуєчої спроможності ОЕС України. Енергетичний потенціал балансуєчих можливостей гідроелектростанцій (ГЕС) та гідроакumuлюючих електростанцій (ГАЕС) значно обмежений як встановленою потужністю, так і сезонними можливостями.

В цих умовах майбутні СЦТ повинні розглядатися не лише як ефективне та екологічно чисте джерело теплової енергії, але й як інструмент стабілізації енергосистеми в умовах збільшення частки мінливої вітрової та сонячної електрогенерації в ОЕС України.

В Україні тривають масштабні процеси термомодернізації будівель та осучаснення комунальної інфраструктури. Однак планування цих процесів відокремлене від модернізації місцевих електричних енергосистем та СЦТ і не має комплексного характеру пов'язаних між собою великих систем, особливо з огляду на перспективні плани перманентної електрифікації країни.

В умовах військово-політичної нестабільності України внаслідок російської воєнної агресії, яка може тривати досить довгий час, суттєво зростає актуальність забезпечення стійкості систем електро- та тепlopозабезпечення населених пунктів зокрема та країни загалом. Цілісний підхід до системної трансформації секторів електроенергетики, тепlopостачання та комунальної інфраструктури населених пунктів відкриває додаткові можливості вирішення цього завдання.

ОЕС України базується на використанні відносно невеликої кількості потужних джерел електричної енергії національного масштабу, ймовірність зруйнування яких є досить великою. Це стосується також і СЦТ населених пунктів України, які базуються переважно на потужних газових котельнях і ТЕЦ та забезпечують опалення близько половини населення країни. Тому при розробці довгострокових планів модернізації систем електропостачання та СЦТ критерій стійкості потрібно враховувати поряд з енергетичною ефективністю та екологічним фактором декарбонізації.

Окремі сектори електропостачання та тепlopостачання складаються з технологічних та технічних засобів, які функціонально пов'язані між собою (рис. 1).

За встановленою потужністю теплових джерел СЦТ Україна займає лідируючі позиції у світі. За інформацією Державної статистичної служби України [5], тепла генерація СЦТ України станом на кінець 2021 року забезпечується опалювальними котельнями (62 %), ТЕЦ (26 %), ТЕС (4 %), АЕС (2 %), теплоутилізаційними установками (4 %) та іншими джерелами тепlopостачання (2 %). За опалювальний сезон 2020/2021 років у СЦТ вироблено 56 ТВт·год теплової енергії (для порівняння: електроенергії вироблено 157 ТВт·год). Більша частка теплової енергії вироблена на теплоцентралях – котельнях (59 %) та ТЕЦ (29 %). Головним споживачем теплової енергії є населення (71 %). На комунально-побутові потреби споживається 26 %, а на виробничі потреби тепlopостачальних компаній – 3 %. Домінуючим видом палива в ЦТ є природний газ (90 %). Доля твердого палива становить 10 %.

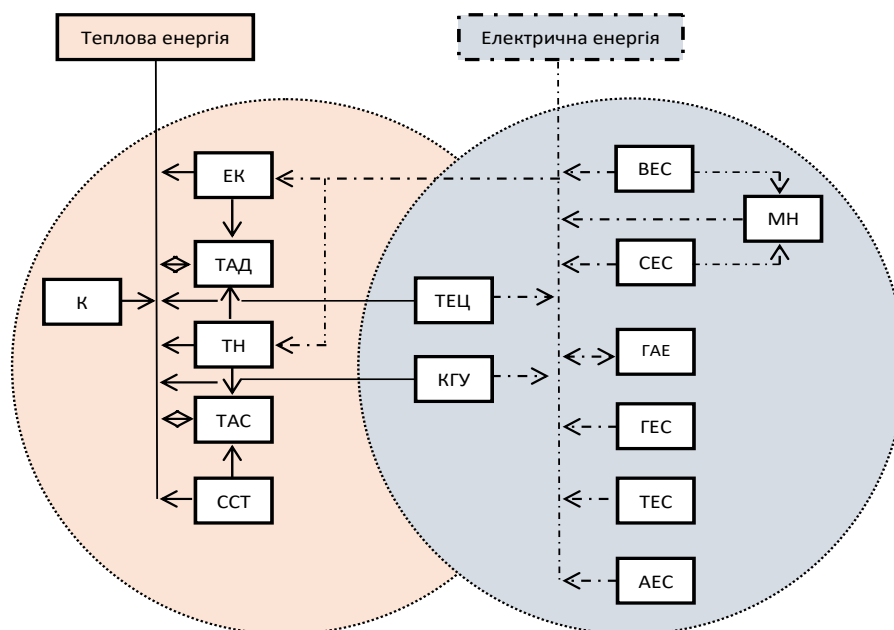


Рисунок 1. Структурна схема технічних засобів електроенергетики та СЦТ

ВЕС – вітрові електричні станції, СЕС – сонячні електричні станції, ГЕС – гідроелектростанції, ГАЕС – гідроакumuлюючі електростанції, ТЕЦ – теплоелектроцентралі, КГУ – малі когенераційні установки, К – паливні котли, ЕК – електричні котли, ТН – теплові насоси, ТАД – теплові акумулятори добові, ТАС – теплові акумулятори сезонні, ССТ – станції сонячного тепlopостачання

Структура виробництва електричної енергії в Україні характеризується такими показниками [6]: атомні електростанції – 51 %, теплоелектростанції – 27 %, теплоелектроцентралі – 9 %, гідроелектростанції та гідроакumuлюючі електростанції – 5 %, сонячні електростанції (СЕС) – 5 %, вітрові електростанції (ВЕС) – 2 %, біопаливні електростанції – 1 %.

Більша частина електричної енергії (51 %) виробляється на АЕС. На ТЕЦ та ТЕС – 36 % електричної енергії. Таким чином, 87 % електричної енергії виробляється за рахунок когенерації, яка пов'язана також з виробництвом теплової енергії, частина якої використовується для тепlopостачання, а решта марнотратно скидається в атмосферу, в той час, коли існують енергоефективні технології її корисного використання (теплові насоси, транспортування теплоти на дальні відстані тощо).

Тільки 5 % електричної енергії виробляється з використанням гідроенергетичних технологій (ГЕС, ГАЕС), які не пов'язані з виробництвом теплоти. Технології електрогенерації з ВДЕ, а саме на сонячних та вітрових електростанціях, не пов'язані з виробництвом теплоти, однак мінливий характер цих виробництв не дозволяє розглядати її без додаткових засобів стабілізації, в якості яких слід розглядати елементи, які є складовими СЦТ – маневрені ТЕЦ, теплові акумулятори, споживачі-регулятори, електричні теплогенератори (теплові насоси та електродкотли). Як видно з вищенаведеного,

95 % електричної генерації так чи інакше пов'язані з тепловою енергією, тому дослідження синергії безпосередньо пов'язаних між собою секторів містить величезний сукупний потенціал підвищення їх енергетичної ефективності, стійкості та екологічної нейтральності (декарбонізації).

Класичним прикладом енергетичної синергії є спільне виробництво електричної та теплової енергії (когенерація), яке на 10–30 % більш ефективне порівняно з роздільним виробництвом цих продуктів. Дослідженню синергії в енергетиці присвячено велику кількість робіт, аналіз яких представлений у [7]. При цьому ефект синергії досягається на технологічному, секторальному та міжсекторальному рівнях. Міжсекторальна синергія дозволяє досягнути максимального ефекту, однак в той же час вона недостатньо глибоко досліджена і реалізована меншою мірою.

Для розуміння масштабів потенціальної синергії СЦТ і електроенергетики доцільно порівняти складові теплової та електричної енергії (виробництво та споживання) в різних секторах економіки за даними [5]. Розглянуто вісім секторів (рис. 2), кожен з яких виробляє електричну (сектори 1.1, 2.1), теплову енергію (сектори 2.2, 3.2) або ж споживає ці види енергії (сектори 4, 5, 6, 7, 8). З рис. 2 видно, що тепла енергія для СЦТ (2.2 + 3.2) є однією з основних складових національного енергетичного балансу. Для порівняння доцільно зазначити, що її частка становить 64 % від електроенергії, виробленої ТЕС, АЕС і ТЕЦ. Ця обставина демонструє співставність за обсягами потоків електричної і теплової енергії, що створює передумови для ефективної синергетичної взаємодії.

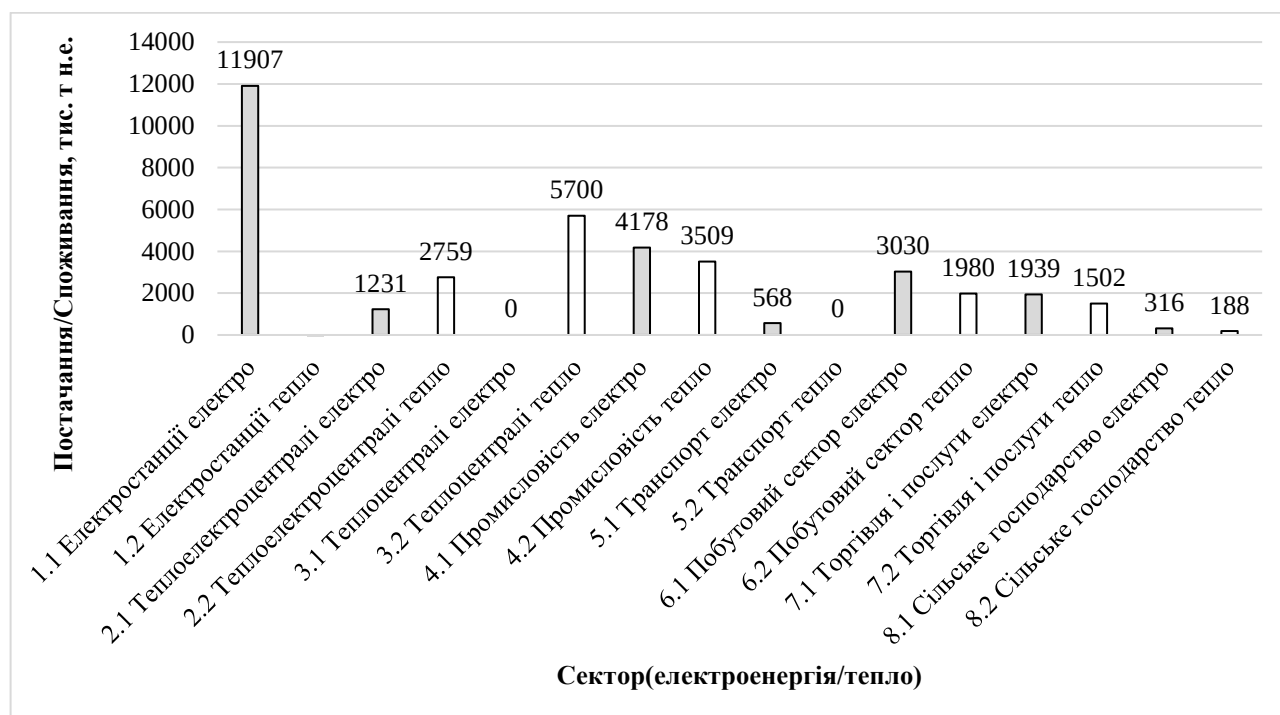


Рисунок 2. Діаграма складових електричної (сірий колір) та теплової (білий колір) енергії в певних економічних секторах національного енергетичного балансу [5]

Однією з основних проблем ОЕС України є дефіцит маневрених генеруючих потужностей, що ускладнює підтримку нерівномірних добових графіків споживання електроенергії в умовах високої частини базової потужності АЕС. Аналіз добових графіків (рис. 3) показує, що амплітуда зміни електричного навантаження становить 5–7 тис. МВт. Встановлена електрична потужність ТЕЦ становить приблизно 6 тис. МВт. Переведення ТЕЦ у режим первинного балансування (первинного регулювання частоти) дозволяє значно підвищити гнучкість та стійкість енергосистеми в умовах нерівномірного добового графіка генерації та споживання електричної енергії. Необхідно, однак, відзначити, що більша частина ТЕЦ вичерпала розрахунковий ресурс роботи, технологічно застаріла та потребує осучаснення з використанням інноваційних технологій, які забезпечать високий рівень енергоефективності та маневрової спроможності цього когенераційного обладнання.

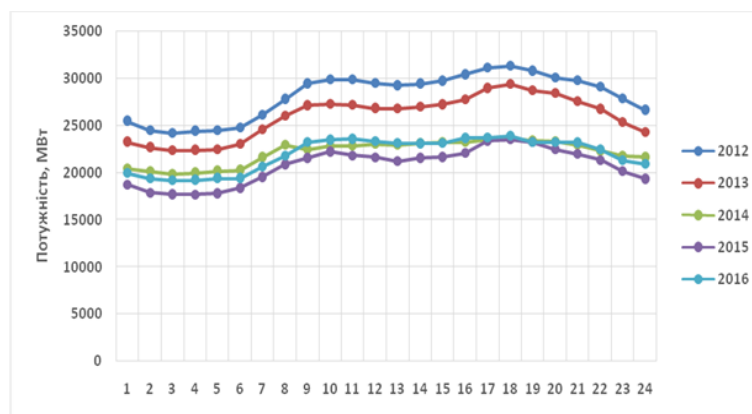


Рисунок 3. Добові графіки електричного навантаження ОЕС України [8]

Україна характеризується високим ступенем урбанізації: у 84 містах країни з населенням більше 50 тис. мешканців та розвинутою комунальною інфраструктурою проживають загалом 20,3 млн мешканців, що складає майже половину населення [9]. Типовий для країни взаємозв'язок між комунальною інфраструктурою міст, міськими енергетичними системами та будівлями проілюстровано на рис. 4.

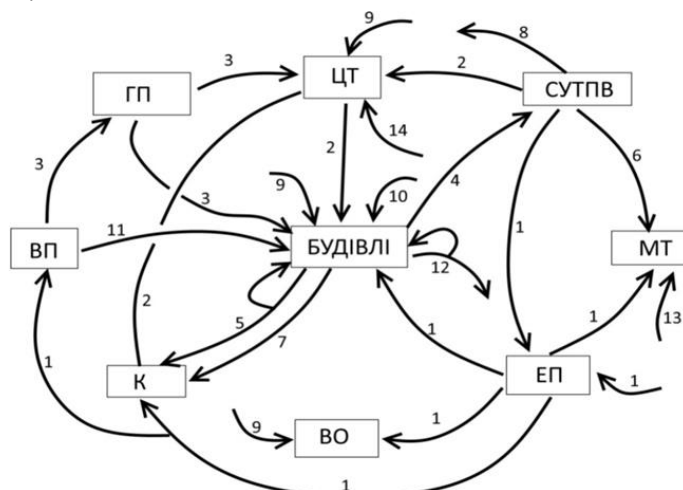


Рисунок 4. Структурна схема взаємозв'язків між міськими енергетичними системами

Підсистеми: ЦТ – централізоване теплопостачання; СУТПВ – система управління твердими побутовими відходами (ТПВ); ГП – газопостачання; ЕП – електропостачання; ВО – вуличне освітлення; МТ – міський транспорт; ВП – водопостачання; К – каналізація.

Матеріальні та енергетичні потоки: 1 – електроенергія; 2 – теплова енергія; 3 – природний газ; 4 – ТПВ; 5 – теплота каналізаційних стоків; 6 – газоподібне паливо; 7 – мулові осадки; 8 – RDF-паливо з відходів; 9 – сонячна енергія; 10 – теплота ґрунту; 11 – вода; 12 – втрати теплоти в навколишнє середовище; 13 – рідке паливо; 14 – біопаливо.

Є значний потенціал міського енергетичного самозабезпечення з використанням місцевих ВДЕ та одночасного вирішення екологічних питань, а саме:

- використання теплоти каналізаційних стоків в СЦТ із застосуванням теплонасосних технологій;
- спалення або газифікація мулових осадків систем очищення каналізаційних стоків з попереднім їх підсушуванням для використання теплової енергії в СЦТ;
- безпосереднє використання скидної теплової енергії промислових підприємств з опалювальними параметрами в СЦТ;

–утилізація низькопотенційної скидної теплової енергії промислових підприємств в СЦТ із застосуванням теплонасосних технологій;

–комбіноване використання сонячної та електричної енергії із застосуванням теплового акумулювання в системах гарячого водопостачання;

–безпосереднє спалювання твердих побутових відходів для комбінованого виробництва електричної та теплової енергії;

–використання гібридних джерел тепlopостачання.

Комплексний підхід до модернізації СТЦ та під'єднаних до них будівель дозволяє не тільки забезпечити підвищення енергетичної ефективності будівель, а також суттєво зменшити капітальні витрати на модернізацію СЦТ.

Техніко-економічний аналіз синергетичного ефекту від реалізації комплексного підходу до модернізації будівель і СЦТ виконано в дослідженні [10] на прикладі модельного теплового району, що містить у своєму складі теплове джерело потужністю 10 МВт, теплові мережі протяжністю 5 км та під'єднані до них будівлі загальною опалювальною площею 180 тис. м², які потребують модернізації.

Розглядаються чотири сценарії модернізації такого теплового району:

А) базовий сценарій – без капіталовкладень. Всі витрати спрямовуються на енергоресурси при існуючих потребах тепла, експлуатацію наявного обладнання, ліквідацію аварій в ТМ, заробітну плату персоналу тощо;

В) модернізація СЦТ із заміною низькоефективних котлів, ТМ, мережевих насосів і збереженням існуючих приєднаних теплових навантажень, встановленої потужності теплового джерела і діаметрів труб ТМ;

С) модернізація СЦТ із заміною низькоефективних котлів, ТМ, мережевих насосів, а також повна термомодернізація будівель (ТБ) з утепленням огорожуючих конструкцій, встановленням енергоефективних вікон та дверей. При цьому зменшується приєднане теплове навантаження будівель, встановлена потужність котлів і діаметри труб ТМ, а також потужність мережевих насосів.

Д) передбачає заходи, як у сценарії С, а також додаткове встановлення індивідуальних теплових пунктів (ІТП) з погодним регулюванням, внаслідок чого досягається додаткова економія споживання теплової енергії.

Результати порівняння сценаріїв А, В, С, D за критерієм сумарних (капітальних і експлуатаційних) витрат за період планування 50 років наведено на рис. 5.

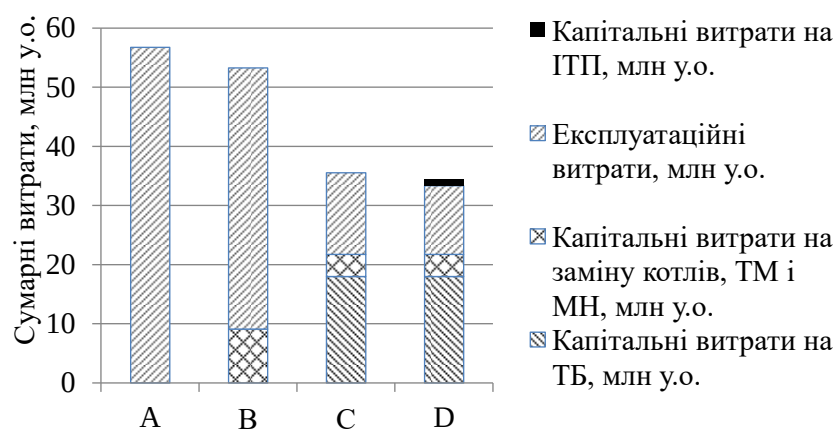


Рисунок 5. Балансова діаграма капітальних та експлуатаційних витрат для сценаріїв А, В, С і D (у.о. = дол. США)

Показано, що капітальні витрати на термомодернізацію будівель є найбільшими, але, незважаючи на це, сумарні витрати через 50 років експлуатації системи для комплексного варіанта D з термомодернізацією будівель в 1,5 раза менші, ніж для варіанта В, коли термомодернізація будівель

не проводилася, оскільки в цьому випадку експлуатаційні витрати на модернізацію СЦТ майже в 4, а капітальні у 2,4 раза більші.

Синергія комплексного (одночасного) підходу до модернізації СЦТ і під'єднаних до неї будівель полягає в тому, що капітальні витрати на модернізацію СЦТ для термомодернізованого теплового району суттєво менші, ніж для нетермомодернізованого, внаслідок зменшення під'єданого теплового навантаження (споживання теплової енергії на обігрів будівель), необхідної встановленої потужності теплового джерела, мережевих насосів та діаметрів труб ТМ. Як результат, сумарні (капітальні та експлуатаційні) витрати на тривалих відрізках часу експлуатації (за життєвий цикл експлуатації цього обладнання) для теплових районів з термомодернізованими будівлями суттєво нижчі, ніж для нетермомодернізованих районів, незважаючи на значні початкові капітальні витрати на термомодернізацію будівель.

Перспективні мультиефективні проєкти та відповідні очікувані синергетичні ефекти в електроенергетиці та теплопостачанні при впровадженні в комунальну інфраструктуру населених пунктів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Перспективні мультиефективні проєкти в електроенергетиці та теплопостачанні

№	Мультиефективні проєкти	Цільові показники					
		Підвищення енерго-ефективності	Декарбонізація	Підвищення балансуєної спроможності ОЕС	Підвищення стійкості електропостачання	Підвищення стійкості теплопостачання	Забезпечення функціонування СЕС та ВЕС
1	Модернізація та підвищення маневреності газових ТЕЦ	+		+			+
2	Поширення малої газової розподіленої когенерації	+		+	+	+	+
3	Впровадження малої розподіленої когенерації на біопаливі		+		+	+	
4	Впровадження потужних ТН на КОС та природних водоймах	+	+				
5	Встановлення ЕК та ТН з ТА на газових котельнях			+		+	+
6	Утилізація скидної теплоти ТЕС і АЕС за допомогою ТН та транспортування теплової енергії на дальні відстані	+	+				
7	Впровадження добового та сезонного теплового акумулювання			+		+	+
8	Комплексна утилізація звалищного газу з полігонів ТБО	+	+		+	+	

Нижче наведено загальний аналіз ролі мультиефективних проєктів (таблиця 1) в інтеграції ОЕС та СЦТ та бар'єри на цьому шляху.

1. Модернізація та підвищення маневреності газових ТЕЦ

Сучасний стан та проблеми перспективного розвитку ТЕЦ України проаналізовані в дослідженнях [7, 11] і можуть бути сформульовані таким чином:

- фізичний знос та технологічна застарілість. Більшість ТЕЦ України експлуатуються впродовж 45–55 років і більше;
- необхідність забезпечення маневреного функціонування на ринку електроенергії та підтримки теплового навантаження за температурним графіком навколишнього повітря та потреб споживача;
- конкурентоспроможність газових ТЕЦ порівняно з вугільними ТЕС і АЕС на ринку електроенергії;
- конкурентоспроможність ТЕЦ у структурі СЦТ порівняно з котельнями в контексті розподілу витрат палива між електричною та тепловою енергією;
- незадовільний стан і велика протяжність ТМ від ТЕЦ до споживачів тепла;
- недостатній ринок збуту теплової енергії від ТЕЦ, через що вони вимушені працювати на пониженому тепловому навантаженні (часто нижче 15 % від проєктного);
- екологічні виклики щодо функціонування ТЕЦ в контексті виконання міжнародних зобов'язань України [12].

Сучасний європейський тренд щодо змін в експлуатації ТЕЦ спрямований на їх широке застосування в умовах ринку балансуєчих послуг. Актуальність переведення ТЕЦ на роботу у змінних режимах буде зростати по мірі зростання частки встановленої потужності мінливої генерації ВЕС і СЕС в загальній встановленій потужності електрогенерації, вичерпання технічного ресурсу роботи і зменшення потужностей вугільних ТЕС, які відіграють на сьогодні поряд з ГЕС та ГАЕС основну роль у регулюванні графіка електричних навантажень в енергосистемі країни.

При виконанні завдань модернізації і підвищення маневрової здатності газових ТЕЦ доцільно спиратись на досвід таких країн Європи, як Данія та Німеччина, які досягли як високого рівня розвитку відновлюваної електроенергетики, так і відчутних результатів у використанні ТЕЦ для балансування енергетичної системи [13–15]. Основні маловитратні напрями підвищення маневреності існуючих газових ТЕЦ базуються на таких техніко-технологічних рішеннях: встановлення водяних баків-накопичувачів теплової енергії, використання електричних котлів та теплових насосів, частковий або повний обвід пари (байпас) повз парову турбіну, реконструкція топкових екранів, пальників, систем автоматизованого регулювання тощо.

Необхідно звернути увагу на наявність певного досвіду функціонування Харківської ТЕЦ-5, Київської ТЕЦ-5 та ТЕЦ-6 щодо балансування навантажень на конкурентному ринку електричної енергії України.

2. Поширення малої газової розподіленої когенерації

В структурі СЦТ України станом на кінець 2021 року функціонувало 46 малих газових когенераційних установок (КГУ) сумарною тепловою потужністю 45 МВт та електричною потужністю до 40 МВт, одинична потужність яких складала 0,5–2 МВт. Використовувались переважно газопоршневі агрегати українських та закордонних компаній-виробників: Первомайськдизельмаш, Caterpillar, Jenbacher, інші.

З наведених даних видно, що частка малої когенерації в Україні складає 0,07 % від встановленої електричної потужності ОЕС України (54 ГВт) і 0,06 % від встановленої теплової потужності СЦТ. Тому вона практично не впливає на національні показники електро- та теплоенергетики країни. Зараз в Україні швидко набирає оберти встановлення малих когенераційних газопоршневих установок (КГПУ) на підприємствах тепло- та водопостачання, тому наведені дані можуть бути застарілими. У країнах ЄС розподілена генерація виробляє в середньому близько 10 % електроенергії. Цей показник більш високий у Данії – досягає 50 %.

В роботі [16] для підвищення стійкості ОЕС України та електрозабезпечення СЦТ запропоновано збільшення в її складі частки розподіленої генерації. Концептуальною ідеєю вирішення цієї проблеми є перетворення існуючих об'єктів критичної інфраструктури із споживачів електроенергії в її

виробників-постачальників, які забезпечать власні потреби та потреби інших споживачів в електроенергії. Такими об'єктами в умовах війни можуть стати котельні СЦТ міст України з їх існуючою електроенергетичною та паливною інфраструктурою. Пропонується широке впровадження на котельнях СЦТ енергоефективних когенераційних газопоршневих установок. Висока маневрова здатність КГПУ дає можливість підвищити гнучкість ОЕС України. Наведено основні техніко-економічні показники розподіленої генерації з використанням КГПУ на існуючих котельнях для подальшого національного планування розвитку розподіленої генерації протягом воєнного стану та післявоєнної відбудови України. Застосування КГПУ на котельнях СЦТ міст України має потенційну можливість забезпечити додаткову розподілену генерацію загальною потужністю до 2366 МВт.

Широкомасштабне поширення малих КГПУ в структурі СЦТ та їх інтеграція в ОЕС України має синергетичний ефект та здатне суттєво покращити характеристики цих систем: енергетичну ефективність СЦТ, балансує спроможність ОЕС та забезпечити можливість збільшення частки мінливої енергогенерації від СЕС та ВЕС (таблиця 1).

Балансуючі можливості малих КГПУ в структурі ОЕС України і одночасне функціонування в СЦТ за температурним графіком будуть суттєво покращені внаслідок їх комплексного застосування із електричними котлами (ЕК) або тепловими насосами та тепловими акумуляторами (ТА) (рис. 6).

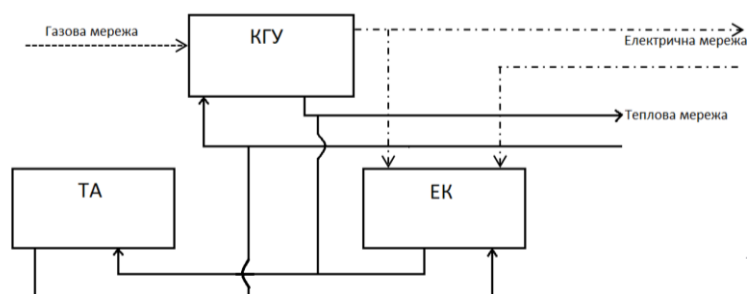


Рисунок 6. Структурна схема комплексного застосування КГПУ з ЕК та ТА

В періоди надлишку (профіциту) електричної енергії в загальній мережі енергосистеми КГПУ зупиняється або працюють виключно на ЕК. ЕК може споживати електричну енергію з електричної мережі як споживач-регулятор. Теплова енергія від ЕК акумулюється в ТА або надається споживачу безпосередньо. В періоди піків споживання електричної енергії та за наявності дефіциту електроенергії в енергосистемі КГПУ працює на електричну мережу. Як в першому, так і в другому періоді споживач отримує теплову енергію від утилізатора КГПУ, ЕК та(або) ТА в різних енергетичних пропорціях.

Вигоди та виклики при впровадженні малої розподіленої когенерації представлені в таблиці 2.

Таблиця 2. Вигоди та виклики при впровадженні малої розподіленої когенерації

ВИГОДИ	ВИКЛИКИ
- Максимальна наближеність до споживачів енергії. Гарантована наявність теплових споживачів при спільному виробленні теплової та електричної енергії. - Зниження витрат на модернізацію (створення) теплових та електричних мереж. - Висока маневреність. Можливість використання КГПУ для покриття піків електричного навантаження. - Підвищення надійності електропостачання населених пунктів. - Підвищення рівня енергетичної безпеки та енергетичної незалежності населених пунктів. - Підвищення конкурентоздатності ринку електричної енергії. - Відносно невеликі початкові інвестиції. Невеликий термін монтажу та введення в експлуатацію.	- Великі відносні витрати для забезпечення диспетчеризації при взаємодії з ОЕС. - Певні складнощі та висока вартість приєднання до електричних мереж. - Відсутність досвіду функціонування на балансуєчому ринку. - Додаткові витрати на транспортування та розподіл електричної енергії.

Для поширення малої газової розподіленої когенерації необхідно додатково проаналізувати наявні бар'єри на шляху функціонування існуючих установок, узагальнити механізми її інтеграції в ОЕС України та розробити заходи стимулювання із використанням європейського досвіду [17].

3. Впровадження малої розподіленої когенерації на біопаливі

Відомо багато когенераційних технологій на біопаливі. Найбільш перспективними та доцільними для впровадження в СЦТ слід вважати такі з них (таблиця 3).

Таблиця 3. Перспективні когенераційні технології на біопаливі

Когенераційна технологія	Діапазон потужності, кВт(е)	Види палива	Переваги / проблеми	Приклади в Україні
Цикл Ренкина, включно (ORC) [18]	≥ 1000	тріска деревини, солома, інші	Можливість використання різних видів біопалива / відсутність агрегатів малої потужності. Велика протяжність ТМ від ТЕЦ до теплових споживачів.	8 ТЕЦ
Міні-ТЕЦ з гвинтовою турбіною на вологій парі [19]	200–400	тріска деревини, інші	Можливість використання різних видів біопалива / Низький електричний ККД	нема
ДВЗ с газифікації біопалива [20–22]	40–1180	тріска, інші	Широкий діапазон потужностей / Підвищені вимоги до якості палива	нема

Мала розподілена когенерація на біопаливі, на відміну від газової когенерації, не призначена для функціонування в режимі надання балансуючих послуг, але має великий ефект декарбонізації та підвищення стійкості електро- та теплопостачання за рахунок заміщення високовартісного та дефіцитного природного газу місцевим біопаливом.

Виконати оцінку техніко-економічної ефективності біопаливних когенераційних технологій, наведених в таблиці 3, можливо шляхом порівняльного аналізу їх показників з традиційними газовими котлами та когенерацією на природному газі, що є перспективним напрямом майбутніх досліджень.

Технології використання електричних теплогенераторів (4, 5 та 6)

Технології 4, 5 та 6 слід розглядати в контексті загальної тенденції електрифікації теплозабезпечення, екологічний ефект якої залежить від джерела походження електроенергії: вугільна, атомна або з ВДЕ. Зважаючи на невелику частку електроенергії з ВДЕ в Україні (менше 10 %), електрифікацію теплозабезпечення поки що не можна розглядати як вагомий фактор декарбонізації. Але зважаючи на домінуючу частку атомної електрогенерації (більше 50 %), електроопалення із застосуванням електричних теплогенераторів (електрокотлів та компресійних теплових насосів з електроприводом) можна розглядати як вагомий фактор декарбонізації.

Слід зауважити два потенційних варіанти електрифікації теплопостачання:

–варіант 1: електрифікація із збереженням та розвитком технологічної та організаційної структури СЦТ;

–варіант 2: електрифікація з переходом до індивідуального (квартирного) теплозабезпечення.

Обидва варіанти мають право на застосування. Вибір того чи іншого варіанта залежить від відомих критеріїв застосування СЦТ: щільності теплового навантаження, можливості використання ВДЕ та скидного теплоенергетичного потенціалу [23]. Слід зазначити великий потенціал інтеграції електро- та теплозабезпечення шляхом застосування варіанта 1.

В роботі [24] запропоновано принципово нову структуру та основи функціонування електротеплової системи. Ця система об'єднує ОЕС України та СЦТ шляхом електрифікації теплопостачання через використання енергії автономних ВДЕ та потужностей традиційної генерації електростанцій в електричних котлах, які не потребують нормованих показників якості електроенергії. Інноваційний принцип взаємовідносин між ОЕС, СЦТ, ВЕС і СЕС забезпечує суттєвий синергетичний ефект: високу технологічність, економічність, надійність і екологічність кожної з цих складових нової системи. Поєднання структур ОЕС та СЦТ вирішує кілька проблем державного значення: в ОЕС

автоматично вирішується нагальна проблема стабілізації частоти і потужності; енергоринок України позбавляється збитків обсягом 15 млрд дол. США щорічно; заміщуються 7,28 млрд м³ природного газу в СЦТ та на 98 млн т в еквіваленті CO₂ скорочуються викиди вуглекислого газу щорічно.

Впровадження потужних ТН для ефективної утилізації низькопотенційної теплової енергії природного та антропогенного походження, зокрема в системах каналізаційного водовідведення та очищення каналізаційних стоків та природних водоймах, є важливим напрямком електрифікації СЦТ, за рахунок якого одночасно досягається сукупний синергетичний ефект внаслідок підвищення енергоефективності та декарбонізації. У статті [25] наведені результати розрахункової оцінки теплового потенціалу та його розподілу по областях України природних та штучних (антропогенних) джерел низькопотенційної теплоти, таких як: навколишнє повітря, вентиляційні викиди будівель, під'єднаних до СЦТ, ґрунти та ґрунтові води, великі річки, стічні каналізаційні води, технологічні скиди котелень та ТЕЦ, теплові вторинні енергетичні ресурси у промисловості. Визначено доступність теплового потенціалу цих джерел для ТН в СЦТ. З'ясовано, що доступний для ТН в СЦТ річний тепловий потенціал та середньорічна теплова потужність становить для: навколишнього повітря – 9735 тис. Гкал та 905 МВт; вентиляційних викидів будівель – 25655 тис. Гкал та 1871 МВт; ґрунту та ґрунтових вод – 2628 тис. Гкал та 87 МВт; великих річок – 3212 тис. Гкал та 299 МВт; стічних каналізаційних вод – 4545 тис. Гкал та 338 МВт; технологічних скидів котелень та ТЕЦ – 2459 тис. Гкал та 724 МВт; теплових вторинних енергетичних ресурсів у промисловості 7661 тис. Гкал та 214 МВт відповідно. Загальний тепловий потенціал зазначених вище джерел становить 4,97 ГВт, що дозволяє використовувати ТН в СЦТ загальною потужністю близько 7,5 ГВт.

Технологічні системи в складі електричних теплогенераторів (ЕТ) і теплових акумуляторів добових (ТАД) на цей час в структурі СЦТ України відсутні. Однак в перспективі ці системи доцільно розглядати як регулятори-споживачі електричної енергії, що використовують її для виробництва та акумулювання теплової енергії з метою запобігання глибокому провалу графіка споживання електроенергії в загальній системі. В роботі [26] наведено результати досліджень щодо використання ЕТ у СЦТ як споживачів-регуляторів, які можуть надавати допоміжні послуги ОЕС України з регулювання її навантаження. Електричні теплогенератори можуть використовувати надлишок електроенергії від ВЕС та СЕС у денний час і під час нічного «провалу» добового графіка електричних навантажень. Режими їх роботи для балансування енергосистеми визначаються диспетчерами ОЕС України. Розрахунки авторів демонструють конкурентоспроможність електричних теплогенераторів порівняно з газовими котлами. Впровадження електричних теплогенераторів сумарною потужністю близько 2500 МВт для регулювання навантаження енергосистеми дозволить підвищити ефективність структури генерації ОЕС України за рахунок підвищення рівня базової генерації АЕС, зменшити щорічне споживання ТЕС природного газу на 604,5 млн м³ та вугілля на 296,7 тис. тонн, зменшити викиди парникових газів на 1691,3 тис. тонн на рік.

7. Технології добового та сезонного акумулювання теплової енергії

У статті [27] оцінено потреби в акумуляції теплової енергії в СЦТ при оснащенні їх електричними теплогенераторами для регулювання навантаження ОЕС України. Проаналізовано процеси акумуляції теплової енергії в магістральних теплових мережах СЦТ в опалювальний та неопалювальний періоди, для проєктного та фактичного температурного графіків. Оцінено граничні добові теплоакумуляційні можливості теплових мереж, які становлять для проєктного температурного графіка 56719 Гкал, для реального – 35112 Гкал, а в неопалювальний період – 25929 Гкал. Частина теплової енергії, яку вироблять електричні теплогенератори, буде замішувати теплову енергію штатних паливних котлів теплових джерел, а інша частина буде акумульована в теплових мережах. При розумному виборі складу електричних теплогенераторів та обсягу заміщення теплової енергії штатних котлів, існуючі магістральні теплові мережі здатні забезпечити ефективне функціонування електричних теплогенераторів при їх використанні як споживачів-регуляторів при покритті графіків електричних навантажень в ОЕС України, чим досягається синергетичний ефект.

Сезонні акумулятори теплової енергії (ТАС) розглядаються в комплексі з сонячними станціями теплопостачання (ССТ). Разом з тим в неопалювальний період ці акумулятори можуть накопичувати теплову енергію від ТН, які в ОЕС країни також можуть застосовуватись як регулятори-споживачі. У статті [28] за результатами аналітичного огляду технологій акумулювання та сезонного зберігання теплової енергії для її подальшого використання в СЦТ з'ясовано, що найбільш досконалою технологією є теплоємнісна акумуляція. Вона найдешевша та найбільш поширена в СЦТ. Для короткострокового зберігання теплової енергії доцільно використовувати баки-акумулятори та магістральні теплові мережі. Для сезонного акумулювання теплової енергії використовуються спеціальні утеплені бетонні підземні сховища як природного, так і штучного походження. Перспективною технологією сезонного зберігання теплової енергії є льодовий акумулятор, розроблений компанією Viessmann, для якого потрібно значно менше простору, ніж для теплоємнісного акумулятора. Термохімічні акумулятори знаходяться на ранніх стадіях розроблення, до 2050 р. можуть бути виготовленні їх демонстраційні зразки.

8. Когенераційна утилізація звалищного газу з полігонів ТБО

В монографії [29] наведена інформація про інноваційні промислові комплекси видобутку, переробки та використання біогазу полігонів та звалищ твердих побутових відходів (ТПВ) з виробництвом електроенергії для загальних електромереж на постійній основі. На цей час у промислову експлуатацію введено більше 30 таких комплексів загальною електричною потужністю 32 МВт та досягнуто синергетичного ефекту: заміщено 250 млн м³ природного газу та зменшено емісію парникових газів у довкілля на 5 млн т CO₂ екв.

5. Обговорення результатів

Багаторівневий кластерний підхід до реалізації цілісного підходу в енергетиці

Цілісний підхід в енергетиці повинен реалізовуватися на національному, регіональному та місцевому рівнях. Кожний рівень реалізації має специфічне завдання та інструменти [30].

На національному рівні формуються законодавча та нормативно-правова бази. На законодавчому рівні повинна бути сформульована загальна концепція цілісного підходу до енергетики на кшталт європейської стратегії [31]. Наприклад, в національне українське законодавство необхідно внести відповідні доповнення та коригування у базові закони у сфері енергетики та енергетичної ефективності [32–37] та(або) розробити національну стратегію інтеграції енергетичних систем.

Крім того, на національному рівні необхідно розробити та затвердити методику розрахунку техніко-економічної ефективності мультиефективних проєктів, які розробляються в одному енергетичному секторі, а корисний ефект досягається одночасно у декількох енергетичних та неенергетичних секторах.

Впровадження цілісного підходу до енергетики на регіональному рівні є найбільш важливим і одночасно найбільш недоопрацьованим питанням. При розгляді цього питання доцільно надати таке визначення поняттю регіональної енергетичної системи.

Регіональна енергетична система – це сукупність первинних джерел енергії, засобів її перетворення, транспортування, зберігання, споживання, які розташовані на території області, забезпечують енергетичні потреби населення та всіх інших сфер діяльності регіону, а також здійснюють обмін енергією з іншими регіонами та країнами.

Елементами такої системи є регіональна електроенергетична система, включно з електричними джерелами та мережами, газотранспортною системою, сферою відновлюваних джерел енергії, комплексом централізованих систем теплопостачання населених пунктів, інфраструктурою населених пунктів (централізоване водопостачання та каналізація, сфера забудови, управління ТПВ, вуличне освітлення, транспорт), споживачі енергії, включно з населенням та різними сферами діяльності регіону.

Складність керування такою системою полягає в тому, що окремі її елементи мають різну форму власності та відомчу підпорядкованість, що робить доцільним застосування кластерного підходу.

Кластер – це галузеве, територіальне, добровільне об'єднання структур різних форм власності та адміністративного підпорядкування, які тісно співпрацюють між собою, із науковими (освітніми) установами, громадськими організаціями та органами місцевої влади з метою підвищення конкурентоздатності власної продукції та послуг і сприяння економічному розвитку регіону. Енергетичний кластер – це об'єднання, метою якого є переважно енергетичні та екологічні цілі.

У дослідженні [38] сформульовано узагальнену методику розробки регіональної програми енергоефективності, яка дає можливість врахувати місцеві особливості та використовувати розроблений документ для планування на загальнодержавному рівні. Також визначено основні етапи розробки регіональної програми, розроблено алгоритм підготовки програми, а також умови, інструменти та основні напрями розробки інвестиційних проєктів. Ключовим компонентом розробки та реалізації програми є регіональна система енергетичного менеджменту, яка має ієрархічну структуру, що складається з локальних підсистем. Запропоновано методологію інтеграції цих підсистем із регіональною енергосервісною компанією, що дає можливість скоординувати діяльність локальних підсистем енергоменеджменту та спрямувати їх на спільну скоординовану взаємодію, отримуючи при цьому додаткові переваги у вигляді підвищення ефективності бізнесу, економії енергоресурсів та збереження навколишнього середовища.

Практична реалізація цілісного підходу на регіональному та місцевому рівні повинна здійснюватися в рамках розроблення регіональних та місцевих енергетичних планів [39]. Відсутність концептуального положення щодо інтеграції енергетики на національному рівні гальмує практичну реалізацію мультиефективних проєктів, які розглядалися у цьому дослідженні.

Вдосконалення законодавчих та нормативно-правових актів

Українське нормативно-правове поле енергетики складається з низки законів та регуляторних актів, кожний з яких окремо стосується певної сфери: електроенергетики [34, 35], відновлюваних джерел енергії [36], централізованого тепlopостачання [33, 37]. Тобто національне енергетичне законодавство має секторальний характер. Закон «Про енергетичну ефективність» [32] певною мірою охоплює всі енергетичні сектори та сектор кінцевого споживання. Однак в перелічених нормативно-правових актах не сформульовані концептуальні положення щодо цілісного підходу до енергетичних секторів та сектору кінцевого енергоспоживання. Відсутні також методичні рекомендації щодо оцінки міжсекторальних синергетичних ефектів.

Доцільно доповнити вищезгадані нормативно-правові акти концептуальним положенням щодо цілісного підходу до електроенергетики, СЦТ та споживачів енергії в комунально-житловій інфраструктурі та підкріпити їх пакетом підзаконних нормативно-методичних документів щодо:

- взаємодії малої розподіленої когенерації з ОЕС країни;
- кількісної оцінки техніко-економічної ефективності синергетичних та мультиефективних проєктів в енергетиці;
- комплексного підходу до термомодернізації СЦТ та під'єднаних до них будівель;
- оцінки вартості виробництва енергії за повний життєвий цикл енергетичних проєктів.

Закон України «Про енергетичну ефективність» певною мірою дозволяє заповнити цю прогалину секторального підходу. Зокрема, цим законом передбачена розробка регіональних енергетичних планів, у яких регіональну енергетику доцільно розглядати як цілісну систему у складі взаємопов'язаних секторів.

6. Висновки

Системні трансформаційні процеси сучасної та майбутньої світової енергетики в напрямі її кліматично нейтрального розвитку обумовлюють необхідність перегляду звичних властивостей традиційної енергетики та актуалізують концепцію комплексної інтеграції окремих енергетичних систем, цілісного підходу до структурної трансформації енергетики та забезпечення умов для більш стійкого функціонування генерації від відновлюваних джерел.

У цьому дослідженні основна увага приділена секторам електричної генерації, централізованого теплопостачання та міської інфраструктури.

Інтеграція енергетики здійснюється за рахунок розробки та впровадження певних інвестиційних проєктів, найбільш вагомими з яких, з позицій інтеграції енергетичних секторів, є синергетичні та мультиефективні проєкти. З цієї точки зору розглянуті інноваційні технології генерації електричної та теплової енергії, наведені приклади їх реалізації та проаналізовані особливості енергетичної системи України, для якої актуальними стали не тільки критерії енергетичної ефективності та екологічної безпеки, а також критерій енергетичної стійкості в умовах викликів, обумовлених перманентною військово-політичною напруженістю та руйнуванням інфраструктури України.

З метою активізації розробки та впровадження такого типу проєктів доцільно створення / удосконалення нормативно-правової та нормативно-методичної бази з урахуванням національних особливостей України.

Внесок авторів. Концептуалізація, обговорення результатів та висновки – В. Бабак, Є. Нікітін, О. Тесленко; вихідні положення та методологія – Є. Нікітін; обґрунтування положень синергетичних та мультиефективних проєктів – Є. Нікітін, О. Тесленко; аналіз та систематизація інформації щодо: модернізації та підвищення маневреності газових ТЕЦ – О. Тесленко, поширення малої газової розподіленої когенерації – Є. Нікітін, О. Тесленко, впровадження малої розподіленої когенерації на біопаливі, когенераційної утилізації звалищного газу з полігонів ТБО – Є. Нікітін, технології використання електричних теплогенераторів – В. Бабак, О. Тесленко, технології добового та сезонного акумулювання теплової енергії – Є. Нікітін, О. Тесленко.

Фінансування роботи. Стаття підготовлена в рамках виконання науково-дослідної роботи «Підвищення ефективності та безпеки функціонування Об'єднаної енергетичної системи шляхом електрифікації теплопостачання в Україні» (КПКВК 6541230, 0123U100983) за фінансування НАН України.

Посилання

1. An EU strategy on energy system integration. Document 52020DC0299. COM(2020) 299 final. European Commission, Directorate-General for Energy. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2020:299:FIN> (дата звернення: 12.09.2024).
2. An EU Strategy on Heating and Cooling. Document 52016DC0051. COM(2016) 51 final. European Commission. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016DC0051> (дата звернення: 10.09.2024).
3. Heat Roadmap Europe. URL: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5be2fd8fb&appId=PGMS> (дата звернення: 12.09.2024).
4. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Textoku> (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Textoku>) (дата звернення: 10.09.2024).
5. Постачання та використання енергії у 2020 році. Державна служба статистики України. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/energ/pve/arh_pve_u.htm (дата звернення: 12.09.2024).
6. Структура електрогенерації в Україні та її зв'язок із тарифами на електроенергію. Торгова енергетична компанія. URL: <https://tek.energy/news/struktura-elektrogeneratsii-v-ukraini-ta-ii-zvyazok-iz-tarifami-na-elektroenergiyu> (дата звернення: 12.09.2024).
7. Карп І.М., Нікітін Є.Є., П'яних К.Є. та ін. Стан та шляхи розвитку систем централізованого теплопостачання в Україні: монографія. Т. 1. Київ: Наукова думка, 2021. 264 с.
8. Находов В.Ф. Управління режимами споживання та ефективністю використання електричної енергії в енергетичних системах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси. Київ, 2018. 52 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23188> (дата звернення: 10.09.2024).
9. Чисельність населення по великих містах України на 01.01.2022. *Індекси. Довідники*. Мінфін України. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/reference/people/town/> (дата звернення: 11.09.2024).
10. Nikitin Ye., Komkov I. An integrated approach to the development of plans for transformation of electrical and heat supply systems. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2022. No. 2. P. 4–16. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2022.01>
11. Басок Б.І., Дубовський С.В., Куделя П.П. Сучасні проблеми функціонування ТЕЦ України. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 6. С. 52–57. <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.052>

12. Про Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/796-2017-%D1%80#Text> (дата звернення: 12.09.2024).
13. Flexibility is the new black. How flexibility enhances value in CHP portfolios in Germany. URL: <https://www.wartsila.com/docs/default-source/power-plants-documents/downloads/white-papers/europe/flexibility-is-the-new-black.pdf> (дата звернення: 12.09.2024).
14. Flexibility concepts for the German power supply in 2050. National Academy of Science and Engineering. URL: https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2016_02_Stellungnahme_Flexibility_concepts.pdf (дата звернення: 12.09.2024).
15. Thermal Power Plant Flexibility. A Publication Under The Clean Energy Ministerial Campaign. 2020. URL: https://www.ea-energianalyse.dk/wp-content/uploads/2020/02/thermal_power_plant_flexibility_2018_19052018.pdf (дата звернення: 12.09.2024).
16. Тесленко О.І. Енергетичний потенціал розподіленої генерації на потужних котельнях України в умовах воєнної агресії. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024. Т. 78. № 1. С. 47—59. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.04>
17. Про сприяння когенерації, що базується на ефективному тепловому навантаженні на внутрішньому ринку енергоносіїв. Директива ЄС 2004/8 від 11.02.2004 р. URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:052:0050:0060:EN:PDF> (дата звернення: 10.09.2024).
18. Biomasse- und Reststoffverstromung. BR Energy Group AG. URL: <http://www.br-eg.com> (дата звернення: 10.09.2024).
19. Kombi Power System. ReGaWatt GmbH. URL: <https://regawatt.de/en/> (дата звернення: 10.09.2024).
20. Referenzen. Syncraft. URL: <https://www.syncraft.at> (дата звернення: 10.09.2024).
21. Walter powerplant. URL: <https://volter.fi/en/products/walter-powerplant/> (дата звернення: 12.09.2024).
22. Steam Expander Generator. URL: https://s3.amazonaws.com/appforest_uf/f1655477689613x255044268818970700/19CM01632-I%20Data%20Sheet%20-%20HP204%20Genset.pdf (дата звернення: 12.09.2024).
23. Карп І.М., Нікітін Є.Є., П'яних К.Є. та ін. Стан та шляхи розвитку систем централізованого теплопостачання в Україні: монографія. Т. 2. Київ: Наукова думка, 2022. 173 с.
24. Babak V., Kulyk M. Increasing the Efficiency and Security of Integrated Power System Operation Through Heat Supply Electrification in Ukraine. *Science and Innovation*. 2023. Vol. 19. No. 5. P. 100—116. <https://doi.org/10.15407/scine19.05.100>
25. Дерій В.О., Соколовська І.С., Тесленко О.І. Оцінка потенціалу джерел низькопотенційної теплоти для теплонасосних установок систем централізованого теплопостачання в розрізі регіонів України. *Системні дослідження в енергетиці*. 2022. № 1(70). С. 4—18. <https://doi.org/10.15407/srenergy2022.01.004>
26. Derii V., Lenchevsky E., Teslenko A., Maistrenko N., Denisov V. Prospects and energy-economic indicators of heat energy production through direct use of electricity from renewable sources in modern heat generators. In A. Zaporozhets, V. Artemchuk (Eds.). *Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Vol. 454. P. 451—463. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_27
27. Дерій В.О., Білодід В.Д. Граничні обсяги акумуляції теплової енергії в системах централізованого теплопостачання. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. Вип. 2(57). С. 41—45. <https://doi.org/10.15407/pge2019.02.041>
28. Дерій В., Згуровець О. Акумулятори теплової енергії. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 3(74). С. 4—14. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.004>
29. Жук Г.В., Іванов Ю.В., Онопа Л.Р., Крушневич С.П., Кубенко С.Б., Вербовський В.С., Малезик П.І. Перспективні газові технології для сучасної України: монографія. Київ: Інститут газу НАН України, Фенікс, 2022. 290 с.
30. Energy Improvement Districts – Conceptual and Technical Guidance for Implementing Cooperative Energy Planning at the District Level. AREA 21. Baltic Sea Region Programme 2014–2020. 2020. 100 p. URL: <https://interreg-baltic.eu/wp-content/uploads/2021/08/105-AREA21-Energy-Improvement-Districts-Book.pdf> (дата звернення: 12.09.2024).
31. EU strategy on energy system integration. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/eu-strategy-energy-system-integration_en (дата звернення: 12.09.2024).
32. Про енергетичну ефективність: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text> (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>) (дата звернення: 11.09.2024).
33. Про теплопостачання: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text> (дата звернення: 11.09.2024).
34. Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2509-15#Text> (дата звернення: 11.09.2024).
35. Про ринок електричної енергії: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (дата звернення: 11.09.2024).
36. Про альтернативні джерела енергії: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (дата звернення: 11.09.2024).

37. Про ринок природного газу: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/329-19#Text> (дата звернення: 11.09.2024).
38. Нікітін Є., Євтухова Т., Новосельцев О., Комков І. Регіональні програми енергоефективності. Поточний стан та перспективи розвитку. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024. Т. 78. № 1. С. 34—47. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.03>
39. Методика розроблення місцевих енергетичних планів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0245-24#Text> (дата звернення: 12.09.2024).

References

1. An EU strategy on energy system integration. Document 52020DC0299. COM(2020) 299 final. European Commission, Directorate-General for Energy. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2020:299:FIN> (Last accessed: 12.09.2024).
2. An EU Strategy on Heating and Cooling. Document 52016DC0051. COM(2016) 51 final. European Commission. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016DC0051> (Last accessed: 10.09.2024).
3. Heat Roadmap Europe. URL: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5be2fd8fb&appId=P-PGMS> (Last accessed: 12.09.2024).
4. On approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period until 2050: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 21, 2023 No. 373-r. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Textoku> (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Textoku> (Last accessed: 10.09.2024) [in Ukrainian]).
5. Energy supply and use in 2020. State Statistics Service of Ukraine. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/energ/pve/arh_pve_u.htm (Last accessed: 12.09.2024) [in Ukrainian].
6. Structure of electricity generation in Ukraine and its relationship with electricity tariffs. Trading Energy Company. URL: <https://tek.energy/news/struktura-elektrogeneratsii-v-ukraini-ta-ii-zvyazok-iz-tarifami-na-elektroenergiyu> (Last accessed: 12.09.2024) [in Ukrainian].
7. Karp, I.M., Nikitin, E.E., P'yanykh, K.E. et al. (2021). State and ways of development of district heating systems in Ukraine [Monograph], Vol. 1. Kyiv: Naukova Dumka (264 p.) [in Ukrainian].
8. Nakhodov, V.F. (2018). Management of consumption regimes and efficiency of use of electric energy in energy systems: author's abstract. dissertation ... doctor of technical sciences: 05.14.01 – energy systems and complexes. Kyiv (52 p.). URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23188> (Last accessed: 10.09.2024) [in Ukrainian].
9. Population in large cities of Ukraine as of 01.01.2022. *Indices. References*. Ministry of Finance of Ukraine. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/reference/people/town/> (Last accessed: 11.09.2024) [in Ukrainian].
10. Nikitin, Y., & Komkov, I. (2022). An integrated approach to the development of plans for transformation of electrical and heat supply systems. *Energy Technologies & Resource Saving*, 2, 4–16. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2022.01>
11. Basok, B.I., Dubovskyi, S.V., & Kudelya P.P. (2022). Modern problems of CHP functioning in Ukraine. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 6, 52–57 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.052>
12. On the National Plan for Reducing Emissions from Large Combustion Plants. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/796-2017-%D1%80#Text> (Last accessed: 12.09.2024) [in Ukrainian].
13. Flexibility is the new black. How flexibility enhances value in CHP portfolios in Germany. URL: <https://www.wartsila.com/docs/default-source/power-plants-documents/downloads/white-papers/europe/flexibility-is-the-new-black.pdf> (Last accessed: 12.09.2024).
14. Flexibility concepts for the German power supply in 2050. National Academy of Science and Engineering. URL: https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2016_02_Stellungnahme_Flexibility_concepts.pdf (Last accessed: 12.09.2024).
15. Thermal Power Plant Flexibility. (2020). A Publication Under The Clean Energy Ministerial Campaign. URL: https://www.ea-energianalyse.dk/wp-content/uploads/2020/02/thermal_power_plant_flexibility_2018_19052018.pdf (Last accessed: 12.09.2024).
16. Teslenko, O. (2024). Energy potential of distributed generation at powerful boiler houses of ukraine in conditions of military aggression. *Energy Technologies & Resource Saving*, 78(1), 47–59 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.04>
17. On the promotion of cogeneration based on efficient heat load in the internal energy market. EU Directive 2004/8 of 11.02.2004. URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:052:0050:0060:EN:PDF> (Last accessed: 10.09.2024).
18. Biomasse- und Reststoffverstromung. BR Energy Group AG. URL: <http://www.br-eg.com> (Last accessed: 10.09.2024).
19. Kombi Power System. ReGaWatt GmbH. URL: <https://regawatt.de/en/> (Last accessed: 10.09.2024).
20. Referenzen. Syncraft. URL: <https://www.syncraft.at> (Last accessed: 10.09.2024).
21. Walter powerplant. URL: <https://volter.fi/en/products/walter-powerplant/> (Last accessed: 12.09.2024).

22. Steam Expander Generator. URL: https://s3.amazonaws.com/appforest_uf/f1655477689613x255044268818970700/19CM01632-I%20Data%20Sheet%20-%20HP204%20Genset.pdf (Last accessed: 12.09.2024).
23. Karp, I.M., Nikitin, Ye.Ye., P'yanykh, K.Ye. et al. (2022). State and ways of development of district heating systems in Ukraine [Monograph], Vol. 2. Kyiv: Naukova Dumka (173 p.) [in Ukrainian].
24. Babak, V., & Kulyk, M. (2023). Increasing the Efficiency and Security of Integrated Power System Operation Through Heat Supply Electrification in Ukraine. *Science and Innovation*, 19(5), 100–116. <https://doi.org/10.15407/scine19.05.100>
25. Derii, V., Sokolovska, I., & Teslenko, O. (2022). Estimation of the potential of low grade heat sources for heat pump plants in district heating systems. *System Research in Energy*, 1(70), 4–18 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2022.01.004>
26. Derii, V., Lenchevsky, E., Teslenko, O., Maistrenko, N., & Denisov, V. (2023). Prospects and energy-economic indicators of heat energy production through direct use of electricity from renewable sources in modern heat generators. In A. Zaporozhets, V. Artemchuk (Eds.). *Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control*, 454 (pp. 451–463). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_27
27. Derii, V.O., & Bilodid, V.D. (2019). Limiting possibilities of the accumulation of thermal energy in centralized heat supply systems. *The Problems of General Energy*, 2(57), 41–45 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2019.02.041>
28. Derii, V., & Zgurovets, O. (2023). Heat Energy Storages. *System Research in Energy*, 3(74), 4–14 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.004>
29. Zhuk, G.V., Ivanov, Yu.V., Onopa, L.R., Krushnevich, S.P., Kubenko, S.B., Verbovsky, V.S., & Malezhyk, P.I. (2022). Promising gas technologies for modern Ukraine [Monograph]. Kyiv: Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Phoenix (290 p.) [in Ukrainian].
30. Energy Improvement Districts – Conceptual and Technical Guidance for Implementing Cooperative Energy Planning at the District Level. (2020). AREA 21. Baltic Sea Region Programme 2014–2020 (100 p.). URL: <https://interreg-baltic.eu/wp-content/uploads/2021/08/105-AREA21-Energy-Improvement-Districts-Book.pdf> (Last accessed: 12.09.2024).
31. EU strategy on energy system integration. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/eu-strategy-energy-system-integration_en (Last accessed: 12.09.2024).
32. On energy efficiency: Law of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text> (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>) (Last accessed: 11.09.2024) [in Ukrainian].
33. About heat supply: Law of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text> (Last accessed: 11.09.2024) [in Ukrainian].
34. On combined heat and power generation (cogeneration) and the use of waste energy potential: Law of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2509-15#Text> (Last accessed: 11.09.2024) [in Ukrainian].
35. About the electricity market: Law of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (Last accessed: 11.09.2024) [in Ukrainian].
36. About alternative energy sources: Law of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (Last accessed: 11.09.2024).
37. About the natural gas market: Law of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/329-19#Text> (Last accessed: 11.09.2024) [in Ukrainian].
38. Nikitin, Ye., Yevtukhova, T., Novoseltsev, O., & Komkov, I. (2024). Regional energy efficiency programs. Current status and development prospects. *Energy Technologies & Resource Saving*, 78(1), 34–47 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.03>
39. Methodology for developing local energy plans. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0245-24#Text> (Last accessed: 12.09.2024) [in Ukrainian].

HOLISTIC APPROACH TO THE SYSTEMIC TRANSFORMATION OF THE ELECTRIC POWER INDUSTRY, DISTRICT HEATING AND MUNICIPAL INFRASTRUCTURE

Vitalii Babak¹, Dr. Sci. (Engin.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-9066-4307>

Yevhen Nikitin^{1,2*}, Dr. Sci. (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-0173-6461>

Oleksandr Teslenko¹, PhD (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3772-5991>

¹General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine;

²Institute of Gas of NAS of Ukraine, 39, Degtyarivska St., Kyiv, 03113, Ukraine

*Corresponding author: nikitin_ee@ukr.net

Abstract. *The article considers the potential of a holistic approach to the electric power system, district heating and municipal infrastructure of settlements. The proposed holistic approach is implemented at the local, regional and national levels. The article analyses a range of investment projects that can help to realise this potential, including cogeneration, heat storage, and electric heating. Particular attention is paid to synergistic and multi-efficiency projects. The concept of energy system sustainability is considered. The author proposes a fundamentally new structure and basis for the functioning of the electric heat system, which combines the national energy system and district heating systems by electrifying heat supply through the use of energy from autonomous variable renewable energy sources and the capacities of traditional power plant generation in electric boilers that do not require standardised power quality indicators. The interrelationships between energy sectors, buildings and municipal infrastructure sectors are traced. Quantitative assessments of some projects are carried out on the example of the integrated energy system of Ukraine and district heating systems. The author proposes directions for improving the national legislative and regulatory framework for implementing a holistic approach to the electricity sector, district heating and municipal infrastructure of settlements.*

Keywords: integrated energy system, district heating, municipal infrastructure, synergy, multi efficiency.

Надійшла до редколегії: 24.10.2024