УДК 514.18

DOI: 10.32347/0131-579x.2024.107.192-206

аспірант, **Баранчук К. О.,**

kyrylo.baranchuk@danfoss.com, ORCID: 0000-0003-4491-9396

Київський національний університет будівництва і архітектури

доцент кафедри теплотехніки, к.т.н. **Погосов О. Г.,**

pohosov.oh@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2158-8897

Київський національний університет будівництва і архітектури

**АДАПТАЦІЯ АЛГОРИТМУ HEAT RECOVERY CONTROL ДЛЯ ДВОНАПРАВЛЕНИХ ТЕПЛОВИХ ПУНКТІВ ТА АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РИНКУ**

***Анотація.*** *У статті досліджується роль двонаправлених індивідуальних теплових пунктів (2Н-ІТП) у формуванні теплових просьюмерів і розвитку peer-to-peer (P2P) ринків теплової енергії. Розглянуто архітектуру 2Н-ІТП, принципи управління тепловими потоками та моделі участі споживачів у децентралізованій торгівлі тепловою енергією. Оцінено техніко-економічну ефективність моделей самоспоживання, спільного використання та агрегування, а також виклики, пов’язані з тарифною політикою, нормативними обмеженнями та поведінкою споживачів. Показано, що активна роль просьюмерів здатна підвищити енергоефективність і гнучкість теплових мереж у ринкових умовах.*

***Ключові слова:*** *двонаправлені ІТП, теплові просьюмери, peer-to-peer ринки, теплова енергія, Heat Recovery Control, енергоефективність, бізнес-моделі, централізоване теплопостачання, теплові мережі, цифрове керування.*

**Постановка проблеми.** Традиційна модель централізованого теплопостачання (ЦТ) не передбачає активної участі споживача у виробництві або зворотній подачі тепла в мережу. Водночас розвиток децентралізованих джерел енергії, цифрових технологій і нових ринкових механізмів відкриває можливості для трансформації споживачів у теплових просьюмерів. Відсутність адаптованих технічних рішень, алгоритмів керування та регуляторної бази обмежує масштабування таких підходів у практиці теплопостачання.

**Ціль статті**. Проаналізувати роль двонаправлених індивідуальних теплових пунктів у створенні теплових просьюмерів, оцінити ефективність застосування peer-to-peer моделей торгівлі теплом і обґрунтувати використання алгоритму Heat Recovery Control (HRC) як інструменту економічно орієнтованого управління тепловими потоками.

**Аналіз основних досліджень і публікацій**. Глобальний перехід до відновлюваної енергетики, децентралізації виробництва тепла та підвищення енергоефективності формує нові вимоги до архітектури теплових мереж і ролі кінцевих споживачів. Сучасні тенденції демонструють зростання розподілених джерел тепла, зокрема теплових насосів, сонячних колекторів та систем рекуперації, що створює підґрунтя для появи так званих теплових просьюмерів — користувачів, які не лише споживають тепло, а й виробляють його та інтегрують у тепломережу [1–4].

Розвиток однорангових (P2P) енергетичних ринків, які успішно застосовуються в електричному секторі [5, 6], поступово поширюється і на сектор теплопостачання. Децентралізовані моделі теплообміну дозволяють споживачам продавати надлишкову енергію сусідам або в мережу через цифрові платформи, уникаючи посередників [7, 8]. Це створює нові бізнес-моделі — від індивідуального самоспоживання до агрегованої торгівлі через координатора або оператора локального теплового ринку [9-11].

Ключовим елементом такої трансформації виступають 2Н-ІТП. Вони забезпечують гнучке керування потоками енергії між централізованою системою теплопостачання та локальними джерелами, дозволяючи реалізовувати функцію інжекції надлишкового тепла в мережу [12-14]. Поряд із розвитком фізичної інфраструктури, активно досліджуються також цифрові методи керування — зокрема, алгоритми динамічного управління рекуперацією тепла (Heat Recovery Control, HRC), які враховують економічні чинники у реальному часі [15].

Проте практичне впровадження таких підходів стикається з рядом бар’єрів — від недосконалої тарифної політики до відсутності регуляторного визнання P2P-ринків тепла [16]. Технічні виклики включають потребу в інтеграції інтелектуальних систем обліку, температурного балансування та цифрової ідентифікації транзакцій [17].

**Ключові технічні аспекти 2Н-ІТП.** Було розроблено та експериментально проаналізовано роботу 2Н-ІТП, який забезпечує гнучке управління тепловими потоками між системою ЦТ, локальним джерелом тепла та системою опалення будівлі. На рис. 1 наведено принципову гідравлічну схему з інтегрованим тепловим насосом, баком-акумулятором (3) і двома теплообмінниками (HEX1 та HEX2).

*1. Теплопостачання від системи ЦТ.* Основне тепло надходить із ЦТ через двоходовий регулювальний клапан M1, що забезпечує погодозалежне регулювання. Потік спрямовується до теплообмінника HEX1 (1), де передається теплова енергія вторинному контуру. Насос P1 подає нагрітий теплоносій до системи опалення будівлі, а температура контролюється датчиком S3.

Після відбору тепла в радіаторах, охолоджений теплоносій повертається через зворотний трубопровід, де фіксується температура S7, і повертається в контур теплообмінника.

*2. Контур внутрішньої циркуляції та споживання.* У системі циркуляція підтримується насосом P1 та P4, коли температура в баці-акумуляторі збільшується. Контроль температури зворотного теплоносія в первинному контурі ЦТ додатково здійснюється датчиком температури S5. Що може бути використано для додаткового обмеження температури.



Рис.1 Принципова схема 2Н-ІТП в умовах проведення фізичного експерименту

*3. Локальне джерело тепла: тепловий насос (ТН) і бак-акумулятор.* Потік з ТН подається насосом P6 до проміжного теплообмінника в баці (3), де енергія накопичується. Температура на виході з ТН контролюється датчиком S10, а бак-акумулятор має верхній та нижній рівні температурного контролю: S11 і S12 відповідно.

Бак-акумулятор дає змогу:

* стабілізувати параметри подачі теплоти в систему опалення;
* накопичувати надлишкову енергію в умовах змінної продуктивності ТН (наприклад, за рахунок зміни температури зовнішнього повітря);
* використовувати накопичене тепло в моменти відключення ЦТ або для зниження пікових навантажень.

Тепло з бака надходить до опалення через триходовий клапан М2, при досягненні заданої температури.

*4. Рекуперація тепла в мережу ЦТ.* Ключовою інноваційною функцією 2Н-ІТП є можливість повернення тепла в мережу ЦТ. Якщо температура в баку-акумуляторі перевищує заданий поріг (наприклад, >48°C), надлишок теплової енергії спрямовується за допомогою циркуляційного насосу P10 до другого теплообмінника HEX2 (2). Через цей теплообмінник тепло передається на сторону ЦТ (залежно від конфігурації), і за наявності відповідного узгодження — продається оператору мережі.

Для підтримання коректного гідравлічного режиму та виключення зворотного руху теплоносія, у системі встановлені зворотні клапани.

**Схеми-алгоритми роботи 2Н-ІТП.**

*1. Режим роботи від системи ЦТ.* У цьому базовому режимі джерелом тепла для системи опалення є мережа ЦТ, яка покриває основне теплове навантаження будівлі (рис. 2). Робота починається з активації циркуляційного насоса P1, який забезпечує подачу теплоносія до споживача. Після цього відкривається регулювальний клапан M2, через який теплоносій проходить через теплообмінник (1) і подається у внутрішній контур опалення.

Температура подачі контролюється датчиком S3 ($T\_{in\\_ОП})$ та порівнюється з розрахунковою температурою ($T\_{розрах}$) згідно з температурним графіком. У разі досягнення або перевищення заданого значення клапан M2 частково або повністю закривається, запобігаючи перегріву і підтримуючи комфортні умови у приміщеннях.

Передача тепла обліковується за допомогою теплолічильника в первинному контурі. Режим роботи від ЦТ є основним у періоди, коли локальні джерела недоступні або неефективні.

Старт

Запуск насосу P1

Надходження тепла в контур опалення від системи ЦТ

Вимірювання переданої енергії тепловим лічильником

Відкриття клапана M2

Вимірювання фактичної температури в контурі опалення та порівняння з $T\_{розрах}$

$T\_{in\\_ОП}=T\_{розрах}$

Клапан М2 зупиняється

$$T\_{in\\_ОП}<T\_{розрах}$$

$$T\_{in\\_ОП}>T\_{розрах}$$

Клапан М2 закривається

Ні

Ні

Так

Рис.2 Алгоритм роботи 2Н-ІТП у режимі теплопостачання від системи ЦТ

*Комбінований режим або робота виключно від локального джерела.* У разі доступності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) або скидного тепла, 2Н-ІТП переходить у комбінований режим (рис. 3). Система оцінює зовнішні умови (наприклад, температуру повітря або графік роботи теплового насоса) та активує попереднє заряджання бака-акумулятора.

Після верифікації умов запускається насос P6, і теплова енергія від теплового насоса подається у бак-акумулятор. Контроль температури в баку ($T\_{акум})$ здійснюється датчиком S11, а передача тепла обліковується теплолічильником.

Якщо температура в баку досягає розрахункового значення ($T\_{акум}\geq T\_{розрах}$), система перемикається: відкривається клапан M1 для подачі тепла з баку, а клапан M2 (ЦТ) закривається. Таким чином, опалення здійснюється переважно або повністю з локального джерела.

Старт

Включення насосу P6, фактичної температури після локального джерела та порівняння з $T\_{розрах}$

Наявність скидного тепла або сприятливі умови для роботи ВДЕ

Вимірювання переданої енергії тепловим лічильником

Робота від ЦТ

Завантаження бака-акумулятору та досягнення $T\_{акум}\geq T\_{розрах}$

Відкриття порту В, клапана М1 та закриття М2

Зменшення температури в баку-акумуляторі $T\_{акум}<T\_{розрах}$

Теплова енергія від локального джерела недоступна

Відключення насосу P6, перевірка умов роботи локального джерела тепла (розклад, прогноз погоди тощо)

Так

Ні

Так

Ні

Так

Рис. 3 Алгоритм роботи 2Н-ІТП у комбінованому режимі або від локального джерела тепла

У разі падіння температури в баку нижче допустимого рівня система оцінює умови повторно: за несприятливих умов відбувається автоматичне повернення до роботи від ЦТ. Така логіка забезпечує динамічне перемикання між джерелами відповідно до доступності, ефективності та температурного графіка.

*3. Режим рекуперації надлишкової теплової енергії в мережу ЦТ (Рис.4).*

Старт

Включення насосу P6, фактичної температури після локального джерела та порівняння з $T\_{розрах}$

Наявність скидного тепла або сприятливі умови для роботи ВДЕ

Вимірювання переданої енергії тепловим лічильником М12

Робота від ЦТ

Завантаження бака-акумулятору та досягнення $T\_{акум}\geq T\_{розрах}$

Відкриття порту В, клапана М1 та закриття М2

Зростання температури в баку-акумуляторі продовжується та досягає $T\_{поріг,f\_{рекуп}}\geq 48℃$

Теплова енергія від локального джерела недоступна

Так

Ні

Ні

Так

Зменшення температури в баку-акумуляторі $T\_{акум}<T\_{розрах}$

Ні

Включення насосів P10, вимірювання переданої в систему ЦТ енергії тепловим лічильником М12

Так

$$T\_{поріг,f\_{рекуп}}<48℃$$

Так

Відключення насосів P10, припинення вимірювання переданої в систему ЦТ енергії

Продовження передачі надлишку теплової енергії в систему ЦТ

Ні

Рис. 4 Алгоритм роботи 2Н-ІТП у режимі рекуперації надлишкового

тепла в систему ЦТ

Режим рекуперації реалізує функцію теплового просьюмера і активується, коли температура у верхній зоні бака-акумулятора перевищує встановлений поріг (наприклад, $T\_{поріг,f\_{рекуп}}\geq 48℃$) після заряджання від локального джерела.

У цьому випадку вмикаються насоси P10, що забезпечують циркуляцію теплоносія через теплообмінник (2) у напрямку мережі ЦТ. Обсяг переданої теплоти фіксується теплолічильником, а керування відбувається на основі температурних показників з датчика S11.

Рекуперація триває до зниження температури нижче порогового значення, після чого насоси P10 автоматично вимикаються. Такий режим підвищує ефективність використання локальних джерел, зменшує пікові навантаження на ЦТ та дозволяє часткову компенсацію теплових витрат за рахунок зворотної подачі.

**Використання в моделі 2Н-ІТП Heat Recovery Control.** У межах експериментального дослідження було застосовано алгоритм HRC для управління тепловими потоками в 2Н-ІТП, з урахуванням цінових коливань вартості електроенергії та тепла. Попри здатність HRC адаптувати режими роботи до економічних умов, у відсутності повноцінної цифрової інфраструктури ці алгоритми залишаються обмежено ефективними. Крім того, в Україні розвиток таких моделей стримується відсутністю лібералізованого ринку тепла та наявністю субсидованого тарифоутворення, що не стимулює споживача до активної участі в управлінні енергопотоками. Ці виклики актуалізують необхідність переходу до гнучкіших і більш прозорих механізмів – зокрема, архітектур peer-to-peer енергетичних ринків.

У HRC рішення про передачу надлишків базується на економічному показнику $C\_{єконом}$ та розраховується за наступним алгоритмом:

*Зір даних:*

Температура бака $(T\_{акум})$, температура системи опалення $(T\_{in\\_ОП})$, температура подачі від ЦТ ($T\_{ЦТпод\\_HX1})$, температура зовнішнього повітря $(T\_{зовн}), $, теплове навантаження $(Q\_{ОП})$.

Ціни: $Price\_{ele}(t)$ - електроенергія для теплового насоса, $Price\_{heat}\left(t\right) $- ціна тепла в тепловій мережі.

*Обчислення теплових потоків:*

У випадку застосування теплового насосу:

 $Q\_{ТН}\left(t\right)=P\_{ТН}\left(t\right)∙COP(t) $ (1)

де:

$P\_{ТН}-$ електрична потужність теплового насоса;

$COP-$ коефіцієнт продуктивності.

 $COP=COP\_{nom}∙\frac{T\_{дж}+273}{T\_{out\\_ТН}+273}$(2)

де:

$COP\_{nom}-$номінальний коефіцієнт продуктивності;

$T\_{out\\_ТН}- $температура теплоносія на виході з теплового насоса;

$T\_{дж}-$температура джерела низькопотенційного тепла.

При передачі в систему опалення:

$Q\_{M1\\_акум}-$тепловий потік від бака через клапан M1:

 $Q\_{M1\_{акум}}\left(t\right)=m\_{M1\\_акум}c\_{p}\left(T\_{акум\_{под}}(t)-T\_{акум\_{зв}}(t)\right)∙f\_{M1}$ (3)

$f\_{M1}=1$*,* якщо $T\_{in\\_ОП}\geq T\_{розрах}$;

$f\_{M1}=0$*,* якщо $T\_{in\\_ОП}<T\_{розрах}$;

При передачу надлишку теплоти в мережу ЦТ:

Якщо температура в баку $T\_{out\\_акум}\geq 48℃$, надлишкове тепло передається в теплову мережу:

  $Q\_{рекуп}(t)=m\_{рекуп}c\_{p}\left(T\_{акум\_{под}}(t)-T\_{акум\_{зв}}(t)\right)∙f\_{рекуп}$ (4)

де:

$f\_{рекуп}=1$*,* якщо $T\_{out\\_акум}\geq 48℃ (значення змінне)$;

$f\_{рекуп}=0$*,* якщо $T\_{out\\_акум}<48℃ (значення змінне)$;

Економічний показник:
Для використання локального джерела тепла:

 $C\_{єконом.лок.дж}= (Price\_{ele}(t)∙P\_{ТН}\left(t\right))- (Price\_{heat}\left(t\right) ∙Q\_{цт}(t))$ (5)

де $C\_{єконом.лок.дж}<0$ означає, що використання теплової енергії від локального джерела вигідніше, ніж від системи ЦТ;

 $C\_{єконом.прос}= (Price\_{heat}(t)∙Q\_{прос}\left(t\right))- (Price\_{ele}\left(t\right) ∙P\_{ТН}\left(t\right))$ (6)

де $C\_{єконом.прос}>0$ означає, що продаж теплоти в мережу ЦТ є вигідним;

$C\_{єконом.акум}= (Price\_{ele}(t)∙P\_{ТН}\left(t\right))- (Price\_{heat}\left(t\right) ∙Q\_{цт}(t)) < (Price\_{heat}\left(t\right) ∙Q\_{цт}(t))- (Price\_{heat}\left(t\right) ∙Q\_{акум}(t))$ (7)

де $C\_{єконом.лок.дж}<$ $C\_{єконом.акум}$ означає, що використання теплової енергії від локального джерела не є вигідним в даний проміжок часу, але є вигідним використати акумульовану теплоту.

**Створення умов для роботи HRC в умовах P2P енергетичних ринків.** Однорангові (peer-to-peer, P2P) ринки енергії — це децентралізовані платформи, на яких учасники можуть напряму купувати й продавати енергію один одному, без участі централізованого оператора. Такі моделі дозволяють інтегрувати різні типи учасників — як споживачів, так і просьюмерів — і використовувати гнучкі механізми розрахунків.

Залежно від рівня централізації, P2P-архітектури поділяють на повністю децентралізовані, спільнотні (community-based) та гібридні [18]. У кожному випадку передбачено свої принципи ціноутворення — від простих двосторонніх переговорів до автоматизованих аукціонів і біржових механізмів, в тому числі гнучких цифрових моделей з виростанням HRC. Додатково враховуються втрати в мережі, обмеження пропускної здатності та інші технічні параметри, що потребують складних алгоритмів розрахунку балансу.

Зростає інтерес до багатокомпонентних P2P-ринків, які охоплюють як електричну, так і теплову енергію. У таких системах учасники можуть вибирати між торгівлею окремими видами енергії або їх комбінацією, залежно від власної вигоди та доступних технологій [19]. Це дозволяє досягти більш ефективного розподілу ресурсів у межах локальних енергоспільнот.

Практична реалізація таких ринків часто базується на новітніх ІТ-рішеннях — блокчейн, розподілені реєстри, смарт-контракти — що забезпечують прозорість та автоматизацію процесів. Водночас, специфіка теплової інфраструктури (інерційність, температурні втрати, зональні тарифи) вимагає врахування гідравлічних і економічних особливостей при проєктуванні таких систем. Сучасні концепції охоплюють як повністю автономні платформи, так і моделі з участю агрегаторів та локальних операторів.

**Бізнес-моделі теплових просьюмерів.** загальненою класифікацією нових ринкових моделей для просьюмерів, наведеною в літературі, є поділ на peer-to-peer торгівлю, спільне (колективне) самоспоживання та поняття трансакційної енергії [20]. У контексті теплових систем це означає наступні бізнес-моделі:

* Індивідуальне самоспоживання з продажем надлишку: Просьюмери використовують тепло з локальних джерел (сонячні колектори, теплові насоси) для покриття власних потреб, а надлишкову енергію подають у теплову мережу. Розрахунки можуть ґрунтуватися на фіксованому тарифі, що нагадує принцип нет-метерингу в електромережах.
* Однорангова торгівля (P2P): Користувачі напряму обмінюються теплом за узгодженими цінами, без участі централізованого постачальника. Така модель передбачає гнучке ціноутворення та потенційно більшу економічну вигоду для обох сторін угоди.
* Спільне самоспоживання: Групи будівель або домогосподарств спільно використовують тепло, генероване на місці, без комерційного обліку. Розподіл енергії здійснюється за внутрішніми алгоритмами, без ринкових механізмів — наприклад, для житлових кооперативів або муніципальних об’єктів.
* Агрегаторська модель: Посередник (агрегатор) представляє інтереси групи просюмерів, організовуючи купівлю-продаж тепла [18]. Такий підхід дозволяє консолідувати пропозиції, оптимізувати облік, знижувати ризики та створювати масштабовані ринкові рішення, наприклад, у межах міських мікромереж.

**Тарифна політика та техніко-економічна ефективність.** Успішне впровадження P2P-моделей у теплопостачанні можливе лише за наявності адаптованої тарифної політики. Стандартні тарифи централізованих мереж не передбачають компенсування зворотної подачі тепла від кінцевих споживачів, що створює суттєвий бар’єр для теплових просьюмерів. Для розвитку P2P-торгівлі необхідні нові гнучкі механізми формування цін, які враховують змінність генерації, споживання та витрати на підтримку мережевої інфраструктури.

Дослідження показують, що за умов застосування динамічного ціноутворення та інтеграції теплових накопичувачів торгівля теплою в рамках P2P може покривати до 25–30% локального попиту, що суттєво знижує залежність від централізованих мереж і загальні витрати [21]. Крім того, експерименти зі взаємодією двох просьюмерів в інтегрованих системах показали, що запровадження торгівлі може знизити загальні витрати на до 4,3% [22] .

Водночас інші дослідження підтверджують, що при незмінних фіксованих тарифах ефект від впровадження двосторонньої теплової системи може бути незначним або відсутнім, особливо за умов нерентабельних тарифів. Проте у сценаріях з високими цінами на електроенергію та низькою ціною на теплову генерацію очікується зниження викидів CO₂ майже на 12,7% — що підтверджує потенціал P2P-моделей за сприятливих умов [23].

Ці результати демонструють, що ефективність P2P-моделей критично залежить від тарифного середовища. Серед переваг зазначають зростання автономності локальних спільнот, зниження витрат на централізоване тепло та підвищення продуктивності систем. Натомість існують виклики — потреба у цифровізації, прозорому ціноутворенні та стимулюючих інвестиційних механізмах для 2Н-ІТП і акумуляторів тепла.

**Регуляторні, технічні та соціальні виклики.** Розгортання 2Н-ІТП у контексті P2P-торгівлі теплом стикається з комплексом викликів:

*Регуляторні обмеження* зумовлені відсутністю правового механізму для продажу тепла споживачами назад у мережу. Поточні нормативні акти в більшості країн орієнтовані лише на централізоване постачання, не передбачаючи ролі приватних джерел у формуванні теплового балансу. Необхідні зміни у законодавстві, зокрема — для впровадження «розумного» обліку, механізмів локальних розрахунків та визнання просьюмерів повноцінними учасниками ринку [24].

*Технічні бар’єри* стосуються забезпечення стабільної роботи мереж при появі зворотних потоків і нових точок генерації. У системах 4-го та 5-го поколінь ЦТ важливо враховувати вплив локального виробництва на гідравлічні параметри, температурний режим і балансування. Водночас потрібна сумісність ІТП із цифровими платформами SCADA/IoT, стандарти кіберзахисту, а також алгоритми безпеки (від перегріву або замерзання) при зворотному поданні тепла.

*Соціальні аспекти* пов’язані з мотивацією та поведінкою користувачів. Реальна участь домогосподарств у P2P-торгівлі є змінною і залежить від особистих стимулів: прагнення зменшити витрати або, навпаки, схильності до співпраці. Водночас, питання захисту персональних даних та прозорості обліку залишаються недостатньо вирішеними — більшість існуючих досліджень лише частково торкаються цієї теми.

У сукупності ці виклики вказують на необхідність поетапного впровадження: запуск пілотних проектів, оновлення нормативної бази, розвиток освітніх програм для споживачів і стандартизація технічних рішень.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У цій роботі розроблено та експериментально досліджено алгоритми управління двонаправленим індивідуальним тепловим пунктом (2Н-ІТП) із функціями акумулювання, рекуперації та інтеграції локальних джерел тепла. Запропоновано використання алгоритму Heat Recovery Control (HRC) як гнучкого механізму розподілу теплової енергії між власними потребами та мережею, що створює основу для майбутнього включення 2Н-ІТП у P2P-архітектури.

Встановлено, що ефективність таких систем значною мірою залежить не лише від технічних характеристик, але й від наявності гнучких тарифів, цифрового управління та законодавчої підтримки. Перехід до однорангових ринків теплової енергії передбачає інтеграцію функціоналу HRC у ширші моделі взаємодії між просюмерами, агрегаторами та централізованими мережами.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку цифрових платформ для моніторингу та прогнозного управління, а також на апробацію P2P-моделей у пілотних енергетичних спільнотах.

**Література**

1. *Lygnerud, K. (2019).* Business model changes in district heating: The impact of the technology shift from the third to the fourth generation. Energies, 12(9), 1778.

2. *Selvakkumaran, S., Axelsson, L., & Svensson, I. L.* Drivers and barriers for prosumer integration in the Swedish district heating sector. Energy Reports. 2021; 7: 193–202.

3. *van der Roest, E., Beernink, S., Hartog, N., van der Hoek, J. P., & Bloemendal, M. (2021*). Towards sustainable heat supply with decentralized multi-energy systems by integration of subsurface seasonal heat storage.*Energies,*14(23), 7958.

4. *Гламаздін, П. М., Баранчук, К. О., & Приймак, О. В. (2021).* Нові підходи до організації централізованого теплопостачання. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання,* 39, 38-46.

5. *Sousa, T., Soares, T., Pinson, P., Moret, F., Baroche, T., & Sorin, E. (2019).* Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 104, 367-378.

6. *Parag, Y., & Sovacool, B. K. (2016).* Electricity market design for the prosumer era. *Nature energy,* 1(4), 1-6.

7. *Padmanaban, S., & Dhanabalan, S. S. (2022).* Peer-to-peer energy trading using blockchain technology. *Energy Reports,* 8, 2348-2350.

8. *Dominković, D. F., Wahlroos, M., Syri, S., & Pedersen, A. S. (2018).* Influence of different technologies on dynamic pricing in district heating systems: Comparative case studies. *Energy,* 153, 136-148.

9. *Burger, S., Chaves-Ávila, J. P., Batlle, C., & Pérez-Arriaga, I. J. (2017).* A review of the value of aggregators in electricity systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 77, 395-405.

10. *Hutty, T. D., & Brown, S. (2024).* P2P trading of heat and power via a continuous double auction. *Applied Energy,* 369, 123556.

11. *Frölke, L. (2023).* Market design for future district heating systems.

12. *Sdringola, P., Ricci, M., Ancona, M. A., Gianaroli, F., Capodaglio, C., & Melino, F. (2023).* Modelling a prototype of bidirectional substation for district heating with thermal prosumers. *Sustainability,* 15(6), 4938.

13. *Licklederer, T., Hamacher, T., Kramer, M., & Perić, V. S. (2021).* Thermohydraulic model of Smart Thermal Grids with bidirectional power flow between prosumers. *Energy,* 230, 120825.

14. *Frölke, L., Sousa, T., & Pinson, P. (2022).* A network-aware market mechanism for decentralized district heating systems. *Applied Energy,* 306, 117956.

15. *Huang, C., Zong, Y., You, S., Træholt, C., Thorsen, J. E., & Larsen, L. F. S. (2022).* Economical heat recovery dynamic control and business model for supermarket refrigeration system coupled with district heating system. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 32, 100800.

16. *Naber, N., Kampman, B., Scholten, T., Vendrik, J., & Van de Water, S. (2021).* Potential of prosumer technologies in the EU. *CE Delft, Delft.*

17. *Lund, H., Duic, N., Østergaard, P. A., & Mathiesen, B. V. (2016).* Smart energy systems and 4th generation district heating. *Energy,* 110, 1-4.

18. *Islam, S. N. (2024).* A review of peer-to-peer energy trading markets: Enabling models and technologies. *Energies,* 17(7), 1702.

19. *Wang, N., Xu, W., Xu, Z., & Shao, W.* Peer-to-Peer Energy Trading among Microgrids with Multidimensional Willingness. *Energies 2018,* 11, 3312.

20. *Capper, T., Gorbatcheva, A., Mustafa, M. A., Bahloul, M., Schwidtal, J. M., Chitchyan, R., ... & Kiesling, L. (2022).* Peer-to-peer, community self-consumption, and transactive energy: A systematic literature review of local energy market models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 162, 112403.

21. *Huang, T., Sun, Y., Xu, Q., Hao, J., Sun, C., & Liu, C. (2023).* A Decentralized Peer-to-Peer Energy Trading Model in Integrated Electric-Thermal System. Authorea Preprints.

22. *Lee, M., Han, C., Kwon, S., & Kim, Y. (2023).* Energy and cost savings through heat trading between two massive prosumers using solar and ground energy systems connected to district heating networks. *Energy,* 284, 129347.

23. *Kim, M. H., Kim, D. W., Lee, D. W., & Heo, J. (2021).* Experimental Analysis of Bi-Directional Heat Trading Operation Integrated with Heat Prosumers in Thermal Networks. *Energies,* 14(18), 5881.

24. *Huang, T., Sun, Y., Hao, J., Sun, C., & Liu, C. (2024).* A distributed peer‐to‐peer energy trading model in integrated electric–thermal system. *IET Renewable Power Generation,* 18(15), 3188-3203.

**References**

1. *Lygnerud, K. (2019).* Business model changes in district heating: The impact of the technology shift from the third to the fourth generation. Energies, 12(9), 1778.

2. *Selvakkumaran, S., Axelsson, L., & Svensson, I. L.* Drivers and barriers for prosumer integration in the Swedish district heating sector. Energy Reports. 2021; 7: 193–202.

3. *van der Roest, E., Beernink, S., Hartog, N., van der Hoek, J. P., & Bloemendal, M. (2021*). Towards sustainable heat supply with decentralized multi-energy systems by integration of subsurface seasonal heat storage.*Energies,*14(23), 7958.

4. *P. Glamazdin, K. Baranchuk, О. Priymak (2021).* New approaches to the organization of district heating. *Ventilation Illumination and Heat Gas Supply,* 39, 38-46.

5. *Sousa, T., Soares, T., Pinson, P., Moret, F., Baroche, T., & Sorin, E. (2019).* Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 104, 367-378.

6. *Parag, Y., & Sovacool, B. K. (2016).* Electricity market design for the prosumer era. *Nature energy,* 1(4), 1-6.

7. *Padmanaban, S., & Dhanabalan, S. S. (2022).* Peer-to-peer energy trading using blockchain technology. *Energy Reports,* 8, 2348-2350.

8. *Dominković, D. F., Wahlroos, M., Syri, S., & Pedersen, A. S. (2018).* Influence of different technologies on dynamic pricing in district heating systems: Comparative case studies. *Energy,* 153, 136-148.

9. *Burger, S., Chaves-Ávila, J. P., Batlle, C., & Pérez-Arriaga, I. J. (2017).* A review of the value of aggregators in electricity systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 77, 395-405.

10. *Hutty, T. D., & Brown, S. (2024).* P2P trading of heat and power via a continuous double auction. *Applied Energy,* 369, 123556.

11. *Frölke, L. (2023).* Market design for future district heating systems.

12. *Sdringola, P., Ricci, M., Ancona, M. A., Gianaroli, F., Capodaglio, C., & Melino, F. (2023).* Modelling a prototype of bidirectional substation for district heating with thermal prosumers. *Sustainability,* 15(6), 4938.

13. *Licklederer, T., Hamacher, T., Kramer, M., & Perić, V. S. (2021).* Thermohydraulic model of Smart Thermal Grids with bidirectional power flow between prosumers. *Energy,* 230, 120825.

14. *Frölke, L., Sousa, T., & Pinson, P. (2022).* A network-aware market mechanism for decentralized district heating systems. *Applied Energy,* 306, 117956.

15. *Huang, C., Zong, Y., You, S., Træholt, C., Thorsen, J. E., & Larsen, L. F. S. (2022).* Economical heat recovery dynamic control and business model for supermarket refrigeration system coupled with district heating system. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 32, 100800.

16. *Naber, N., Kampman, B., Scholten, T., Vendrik, J., & Van de Water, S. (2021).* Potential of prosumer technologies in the EU. *CE Delft, Delft.*

17. *Lund, H., Duic, N., Østergaard, P. A., & Mathiesen, B. V. (2016).* Smart energy systems and 4th generation district heating. *Energy,* 110, 1-4.

18. *Islam, S. N. (2024).* A review of peer-to-peer energy trading markets: Enabling models and technologies. *Energies,* 17(7), 1702.

19. *Wang, N., Xu, W., Xu, Z., & Shao, W.* Peer-to-Peer Energy Trading among Microgrids with Multidimensional Willingness. *Energies 2018,* 11, 3312.

20. *Capper, T., Gorbatcheva, A., Mustafa, M. A., Bahloul, M., Schwidtal, J. M., Chitchyan, R., ... & Kiesling, L. (2022).* Peer-to-peer, community self-consumption, and transactive energy: A systematic literature review of local energy market models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 162, 112403.

21. *Huang, T., Sun, Y., Xu, Q., Hao, J., Sun, C., & Liu, C. (2023).* A Decentralized Peer-to-Peer Energy Trading Model in Integrated Electric-Thermal System. Authorea Preprints.

22. *Lee, M., Han, C., Kwon, S., & Kim, Y. (2023).* Energy and cost savings through heat trading between two massive prosumers using solar and ground energy systems connected to district heating networks. *Energy,* 284, 129347.

23. *Kim, M. H., Kim, D. W., Lee, D. W., & Heo, J. (2021).* Experimental Analysis of Bi-Directional Heat Trading Operation Integrated with Heat Prosumers in Thermal Networks. *Energies,* 14(18), 5881.

24. *Huang, T., Sun, Y., Hao, J., Sun, C., & Liu, C. (2024).* A distributed peer‐to‐peer energy trading model in integrated electric–thermal system. *IET Renewable Power Generation,* 18(15), 3188-3203.

PhD Student, **Kyrylo Baranchuk,**

kyrylo.baranchuk@danfoss.com, ORCID: 0000-0003-4491-9396

Kyiv National University of Construction and Architecture

thermal engineering dep. as. prof., PhD, **Oleksandr Pohosov,**

pohosov.oh@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2158-8897

Kyiv National University of Construction and Architecture

**ADAPTATION OF THE HEAT RECOVERY CONTROL ALGORITHM FOR BIDIRECTIONAL HEATING SUBSTATION AND ANALYSIS OF ENERGY MARKET MODELS**

***Abstract.*** *The article examines the role of bidirectional heating substation in the formation of heat prosumers and the development of peer-to-peer (P2P) heat energy markets. The architecture of bidirectional heating substation, principles of heat flow management and models of consumer participation in decentralized heat energy trading are considered. The technical and economic efficiency of self-consumption, sharing and aggregation models is assessed, as well as the challenges associated with tariff policy, regulatory restrictions and consumer behavior. It is shown that the active role of prosumers can increase the energy efficiency and flexibility of heat networks in market conditions..*

***Keywords:*** *bidirectional heating substation, thermal prosumers, peer-to-peer markets, thermal energy, Heat Recovery Control, energy efficiency, business models, district heating, district heating networks, digital control.*