

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Розглянуті проекти комплексного використання відновлювальних джерел енергії. Проведено оцінку ефективності використання ВДЕ у автономних системах теплопостачання з мінімальним використанням сторонніх джерел енергії, зниження питомої вартості погодинного теплопостачання. Розроблено новий програмно-інформаційний комплекс для моделювання автономних систем теплопостачання з мінімальним використанням сторонніх джерел енергії. За допомогою розробленого програмно-інформаційного комплексу виконано моделювання оптимізованих режимів експлуатації автономної системи теплопостачання та одержано чисельні оцінки ефективності використання відновлюваних джерел енергії в системі.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, система теплопостачання, режим експлуатації, моделювання, програмний комплекс, енергозбереження

Вступ.

Визначення структури системи теплопостачання [1] відповідно до можливих навантажень є першим кроком у процесі визначення можливих комбінацій споживачів та виробників в управлінні енергетичним балансом. При цьому виникає необхідність визначення ефективних способів обміну тепловою енергією між вузлами споживання та системою теплопостачання протягом доби, тижнів, місяців, нарешті, всього року з урахуванням обмежень наступних параметрів: робочий діапазон мережі, теплові навантаження, технології, використання типових установок для різних типів споживачів, використання накопичувачів енергії.

Традиційно мережі централізованого теплопостачання та охолодження розподіляють енергію від централізованої генеруючої установки до низки віддалених споживачів. Недоліками такого підходу є: значні втрати тепла, погано вивчений потенціал інтеграції різних доступних джерел енергії, великі інсталяційні витрати.

Команда FLEXYNETS [2] пропонує використовувати нове покоління інтелектуальних мереж централізованого опалення та охолодження, які зменшують втрати при транспортуванні енергії, працюючи при «нейтральних» (15-20°C) рівнях температури. Реверсивні теплові насоси використовуються для теплообміну з мережею на стороні споживача, забезпечуючи необхідне опалення та охолодження будівель. Таким чином, одна і та ж мережа може забезпечити сучасне опалення та охолодження. Такі мережі дозволяють утилізувати відпрацьоване тепло мережі, навіть при низьких температурах, на відміну від традиційних мереж централізованого теплопостачання, які можуть збирати теплову енергію лише при температурі більше 100°.

У зв'язку зі складною ситуацією в Україні актуальною представляється задача оцінки потенціалу та ефективності використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) при проектуванні автономної локальної системи теплопостачання для котеджного селища на базі місцевих енергоресурсів та з мінімальним використанням сторонніх джерел енергії [3]. Також необхідно проаналізувати зменшення негативного впливу на навколишнє середовище за рахунок використання відновлювальних джерел енергії.

Мета дослідження.

Метою дослідження є оцінка ефективності використання ВДЕ у автономних системах теплопостачання з мінімальним використанням сторонніх джерел енергії. Оцінка зниження питомої вартості погодинного теплопостачання зі збільшенням частини теплової енергії, що поставляється за рахунок ВДЕ, і відповідно, зниженням частини газової, а в загальному випадку будь-якої іншої генерації на технологіях вичерпного палива, в загальному обсязі тепло забезпечення.

Матеріали та методи.

Для моделювання режимів експлуатації автономної системи теплопостачання на платформі Solver Studio [4] автором розроблено новий програмно-інформаційний комплекс, який дає можливість погодинного моделювання та дослідження оптимальних режимів функціонування теплових агрегатів автономних систем теплопостачання.

Вихідними даними для розрахунків були обрані:

1. Матриця прогнозних річних значень (рис. 1): зовнішньої температури, потреби теплопостачання, потреби холодопостачання, теплового навантаження, отриманих шляхом адаптації реального річного

графіка зовнішньої температури Стокгольма [5] до географічного положення Київської області. При адаптації використані дані погодинного аналізу та формули наведені у [2] та [6].

2. Вектори прогнозних річних значень потужності сонячного та вітрового теплопостачання одержані шляхом адаптації фактичних значень наведених в [7].

3. Матриці значень необхідних обсягів теплопостачання та собівартості використаних при моделюванні технологій (газова котельня – ГК, геотермальна свердловина, реверсивний тепловий насос, накопичувач теплової енергії, сонячний колектор, вітрова станція) одержані з Excel версії програмного додатку FLEXYNETS-tool_ver-1-0+GNU.xlsm [8], який розроблено для проведення попередніх техніко-економічних обґрунтувань реалізації концепції FLEXYNETS за різними сценаріями.

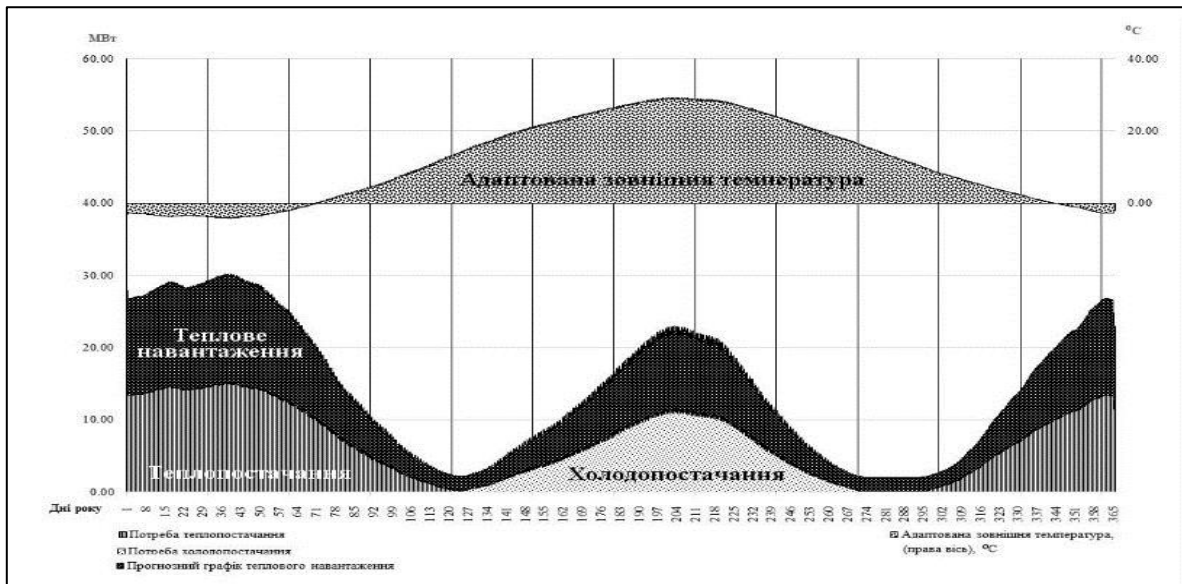


Рисунок 1 – Прогнозні графіки зовнішньої температури, потреби теплопостачання, потреби холодопостачання, теплового навантаження.

Використовуючи вищевикладене як вихідні дані, в розробленому програмно-інформаційному комплексі застосована модель оптимізації режимів експлуатації теплогенеруючих потужностей, яка відноситься до класу оптимізаційних задач – Optimal Unit Commitment of Power System (задача оптимального завантаження генеруючих потужностей енергосистем) із критерієм мінімізації витрат на виробництво, накопичення та споживання теплової та електроенергії. В загальному вигляді математична модель складається з критерію оптимальності та обмежень. Критерій оптимальності (1) – мінімальні витрати на виробництво, накопичення та споживання теплової енергії при дотриманні точного покриття графіку теплового навантаження (2). Суворо виконуються технологічні обмеження на режими використання теплогенеруючих агрегатів, накопичувачів теплової енергії (PTES) та елементів теплової мережі.

$$\sum_t \left\{ \sum_g \left(P_{tg}^{Gen} c_{tg}^{Gen} + S_{tg}^{Start} c_{tg}^{Start} \right) + \sum_{ptes} \left(P_{ptes}^{Gen} c_{ptes}^{Gen} + P_{ptes}^{Charge} c_{ptes}^{Charge} + S_{ptes}^{Start} c_{ptes}^{Start} \right) \right\} \rightarrow \min, (1)$$

$$\left\{ \sum_g \left(P_{tg}^{Gen} \right) + \sum_{ptes} \left(P_{ptes}^{Gen} - P_{ptes}^{Charge} \right) - \sum P_t^{Loss} \right\} = DLP(t); \forall t \in T; (2)$$

де: T – період (час у годинах); $G, PTES$ – множина генеруючих та накопичуючих потужностей; P – потужність: Gen – генерації, $Charge$ – накопичення, $Loss$ – Втрати, МВт; S – кількість стартів теплоагрегату; c – вартість, \$/МВт·год; $DLP(t)$ – теплове навантаження, МВт.

За рахунок того, що у моделі враховано специфічні особливості роботи теплогенеруючих, та накопичувальних потужностей автономної системи теплопостачання: встановлені потужності складових енергосистем, граничні можливості зміни потужності агрегатів накопичення та генерації теплової енергії, математична оптимізаційна модель має переваги адекватного моделювання режимів використання агрегатів.

Модель реалізована на мові алгебраїчного моделювання MathProg, що реалізована в середовищі моделювання COIN-OR PuLP [4]. Використання моделі дозволило дослідити можливості оптимізованої диспетчеризації теплогенеруючих потужностей, а також генеруючих та резервних потужностей

накопичувачів тепла великої ємності в складі роботи автономної системи теплопостачання, меж допустимих значень параметрів генеруючих і накопичуючих потужностей, при яких можлива стійка збалансована робота системи теплопостачання та оцінити ефективність використання ВДЕ у автономних системах теплопостачання з мінімальним використанням сторонніх джерел енергії.

Для визначення оптимальних режимів використання генеруючих та накопичуючих потужностей при покритті графіків теплових навантажень було використано новий розроблений автором програмно-інформаційний комплекс, який дає можливість погодинного моделювання та дослідження оптимальних режимів функціонування теплових агрегатів автономних систем теплопостачання та оцінити ефективність використання в них відновлюваних джерел енергії.

Результати та обговорення

Україна має значні запаси неосвоєних місцевих енергоресурсів у вигляді відновлюваних джерел енергії, природного газу з некондиційних родовищ, гідроенергії малих річок та ін. [3]. Проекти на основі комплексного використання відновлюваних джерел енергії – геотермальної, сонячної та вітрової – дозволяють створювати автономні системи теплопостачання з мінімальним використанням сторонніх джерел енергії.

Розроблено програмно-інформаційний комплекс для моделювання функціонування автономних систем теплопостачання, що дозволяє забезпечити оптимальний вибір агрегатів та режимів їх експлуатації, які забезпечуватимуть вироблення та перерозподіл енергії відповідно до графіка споживачів та оцінити ефективність використання відновлюваних джерел енергії у автономних системах теплопостачання з мінімальним використанням сторонніх джерел енергії.

За допомогою програмно-інформаційного комплексу виконано моделювання оптимізованих режимів експлуатації системи теплопостачання для котеджного селища на базі місцевих енергоресурсів з мінімальним використанням сторонніх джерел енергії, яке дозволило розрахувати параметри, що забезпечують оптимізоване покриття графіка теплового навантаження котеджного селища на базі місцевих енергоресурсів з мінімальним використанням сторонніх джерел енергії на прикладі прогнозованих значень встановленої теплової потужності енергоагрегатів та матриці прогнозних річних значень: зовнішньої температури, потреби теплопостачання, потреби холодопостачання, теплового навантаження, отриманих шляхом адаптації реального річного графіка зовнішньої температури Стокгольма [5] до географічного положення Київської області та одержати чисельні оцінки порівняльної ефективності використання відновлюваних джерел енергії в автономній системі теплопостачання.

Нижче представлено значення найбільш вагомих параметрів, що були використані при розрахунках в процесі математичного моделювання.

Географічне положення – Київська область України. Тип району – ґрунтова ділянка/новий район. Площа котеджного селища 3,1 км² з низькою щільністю житлової забудови 2,6 км² та публічним простором 0,5 км². Кількість котеджів 44. Річна потреба в теплі 39,9 ГВт·год. Обсяги сумарного теплового навантаження для обраних діб склали від 7 900 до 35 773 МВт·год.

Нагрівачі базового та резервного навантаження: котельня на природному газі з встановленою потужністю 30 МВт, геотермальна свердловина потужністю 1,06 МВт, реверсивні теплові насоси з тепловою потужністю 7,32 МВт, вітрова станція з перетворювачем електрики в тепло 3,6 МВт, сонячний колектор потужністю 6,71 МВт, накопичувач теплової енергії, що має ємність 50 МВт·год та потужність 7,96 МВт.

Обмін тепловою енергією з мережею: річний відбір тепла (нетто) – 39,9 ГВт·год, тепло конденсації, що вводиться в мережу – 14,6 ГВт·год/рік, річні втрати тепла від мережі – 3,62 ГВт·год/рік, доступне відхідне тепло – 40,0 ГВт·год, відхідне тепло, що вводиться в мережу – 22,7 ГВт·год, річне виробництво тепла – 12,8 ГВт·год/рік.

Обсяги сумарного теплового навантаження для обраних діб склали від 79 до 358 МВт·год. Собівартість теплопостачання, якщо використовується тільки газова котельня, біля 37 Євро/МВт·год. Собівартість теплопостачання, якщо використовується газова котельня та відновлювані джерела енергії змінюється від 19 до 28 Євро/МВт·год.

Приклад результатів моделювання з використанням графіка теплового навантаження для доби 10 січня 2018 року представлено в таблиці 1 та на рис. 2.

Чисельні оцінки порівняльної ефективності за рахунок використання або не використання відновлюваних джерел енергії в автономній системі теплопостачання представлено в таблиці 2 і на рис. 3 та 4.

Таблиця 1 – Погодинне теплове навантаження та теплова потужність (МВт) теплоагрегатів
10 січня 2018 року

Години	Навантаження	Газова котельня	Геотермальна свердловина	Тепловий насос	Накопичувач, розряд	Накопичувач, заряд	Сонячний колектор	Вітрова станція	% ВДЕ	% Газова котельня	Собівартість €/МВт-год
1	14.20	5.00	1.06	7.32	0	0	0.00	0.82	65	35	27.40
2	14.27	5.18	1.06	7.32	0	0	0.00	0.71	64	36	27.69
3	14.33	5.35	1.06	7.32	0	0	0.00	0.60	63	37	28.06
4	14.39	5.47	1.06	7.32	0	0	0.00	0.54	62	38	28.22
5	14.44	5.84	1.06	7.32	0	0	0.00	0.23	60	40	29.01
6	14.49	5.81	1.06	7.32	0	0	0.00	0.30	60	40	28.84
7	14.52	5.91	1.06	7.32	0	0	0.00	0.23	59	41	29.06
8	14.52	6.02	1.06	7.32	0	0	0.00	0.12	59	41	29.34
9	14.42	5.76	1.06	7.32	0	0	0.08	0.21	60	40	28.84
10	14.25	5.59	1.06	7.32	0	0	0.22	0.06	61	39	28.78
11	14.01	4.99	1.06	7.32	0	0	0.54	0.10	64	36	27.70
12	13.75	4.13	1.06	7.32	0	0	1.18	0.06	70	30	25.97
13	13.51	3.55	1.06	7.32	0	0	1.53	0.06	74	26	24.87
14	13.32	3.67	1.06	7.32	0	0	1.24	0.03	72	28	25.52
15	13.18	3.95	1.06	7.32	0	0	0.81	0.06	70	30	26.55
16	13.09	4.06	1.06	7.32	0	0	0.58	0.08	69	31	27.05
17	13.05	4.54	1.06	7.32	0	0	0.05	0.09	65	35	28.43
18	13.10	4.61	1.06	7.32	0	0	0.00	0.11	65	35	28.55
19	13.24	4.74	1.06	7.32	0	0	0.00	0.12	64	36	28.63
20	13.44	4.96	1.06	7.32	0	0	0.00	0.11	63	37	28.71
21	13.68	5.22	1.06	7.32	0	0	0.00	0.09	62	38	28.95
22	13.90	5.36	1.06	7.32	0	0	0.00	0.16	61	39	28.86
23	14.05	5.47	1.06	7.32	0	0	0.00	0.21	61	39	28.89
24	14.17	5.58	1.06	7.32	0	0	0.00	0.22	61	39	28.93

Таблиця 2 – Чисельні оцінки порівняльної ефективності за рахунок використання або не використання ВДЕ в автономній системі теплопостачання

	Сумарна генерація, МВт-год	Сумарна вартість теплопостачання, тільки газова котельня, Євро	Собівартість теплопостачання, тільки газова котельня, Євро/МВт-год	Сумарна вартість теплопостачання, газова котельня та ВДЕ, Євро	Собівартість теплопостачання, газова котельня та ВДЕ, Євро/МВт-год	Співвідношення собівартості теплопостачання ГК та ВДЕ / ГК, %
10 січня	333.32	12 331	36.99	9 351	28.05	76
20 січня	343.88	12 724	37.00	9 346	27.18	73
10 лютого	357.73	13 236	37.00	10 299	28.79	78
20 лютого	338.46	12 525	37.01	9 113	26.92	73
10 березня	249.68	9 239	37.00	6 525	26.13	71
20 березня	181.35	6 710	37.00	4 164	22.96	62
10 листопада	79.01	2 924	37.01	2 213	28.01	76
20 листопада	134.69	4 983	37.00	2 567	19.05	52
10 грудня	241.15	8 920	36.99	6 003	24.89	67
20 грудня	284.02	10 509	37.00	6 642	23.39	63

Отримані результати свідчать про зниження питомої вартості погодинного теплопостачання зі збільшенням частини теплової енергії, що поставляється за рахунок ВДЕ, і відповідно, зниженням частини газової, а в загальному випадку будь-якої іншої генерації на технологіях викопного палива, в загальному обсязі тепло забезпечення. Таким чином, підтверджується ефективність використання ВДЕ на базі місцевих енергоресурсів у складі системи теплопостачання коледжного селища.

Висновки

Проекти на основі комплексного використання ВДЕ дозволяють створювати автономні системи теплопостачання з мінімальним використанням сторонніх джерел енергії. Розроблено новий програмно-інформаційний комплекс для моделювання автономних систем теплопостачання з мінімальним використанням сторонніх джерел енергії, який дозволяє дослідити параметри використання теплоагрегатів, виявити допустимі межі їх експлуатації, забезпечити оптимальне стійке функціонування системи теплопостачання при умові забезпечення вироблення і перерозподілу енергії відповідно до графіка споживання та оцінити ефективність використання ВДЕ у системі. За допомогою розробленого програмно-інформаційного комплексу, який дає можливість погодинного моделювання та дослідження

оптимальних режимів функціонування теплових агрегатів автономних систем тепlopостачання з мінімальним використанням сторонніх джерел енергії, виконано моделювання оптимізованих режимів експлуатації автономної системи тепlopостачання та одержано чисельні оцінки ефективності використання відновлюваних джерел енергії в системі.

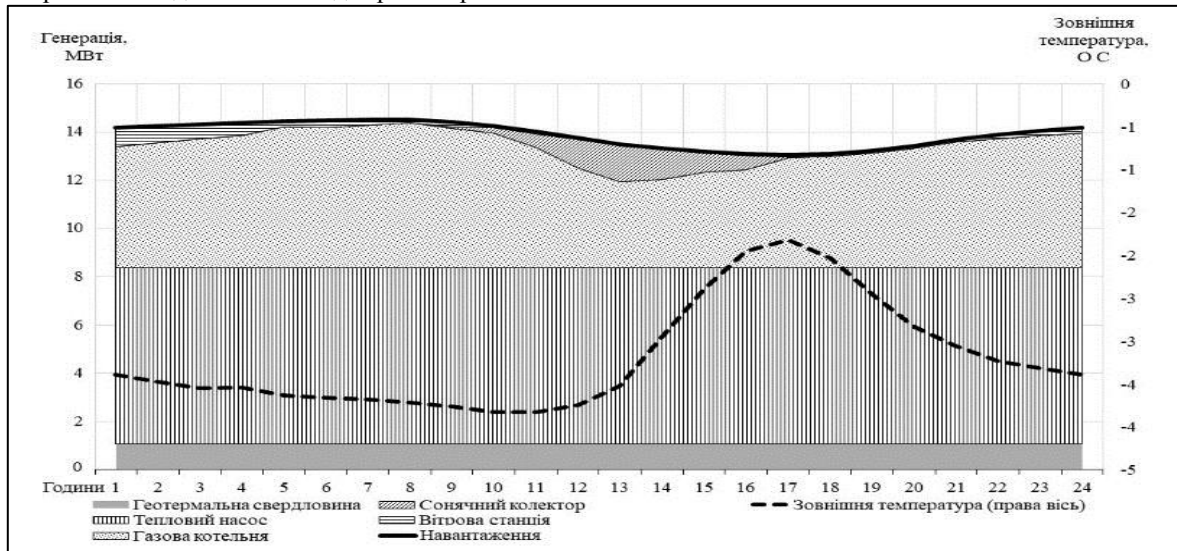


Рисунок 2 – Погодинне теплове навантаження та тепла потужність (МВт) теплоагрегатів

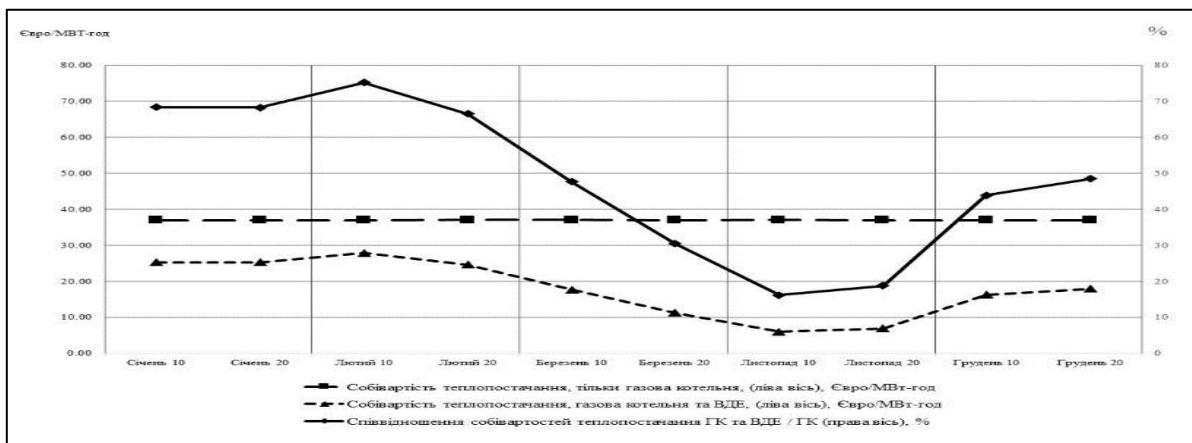


Рисунок 3 – Чисельні оцінки собівартості в автономній системі тепlopостачання для характерних діб опалювального сезону за рахунок використання ВДЕ

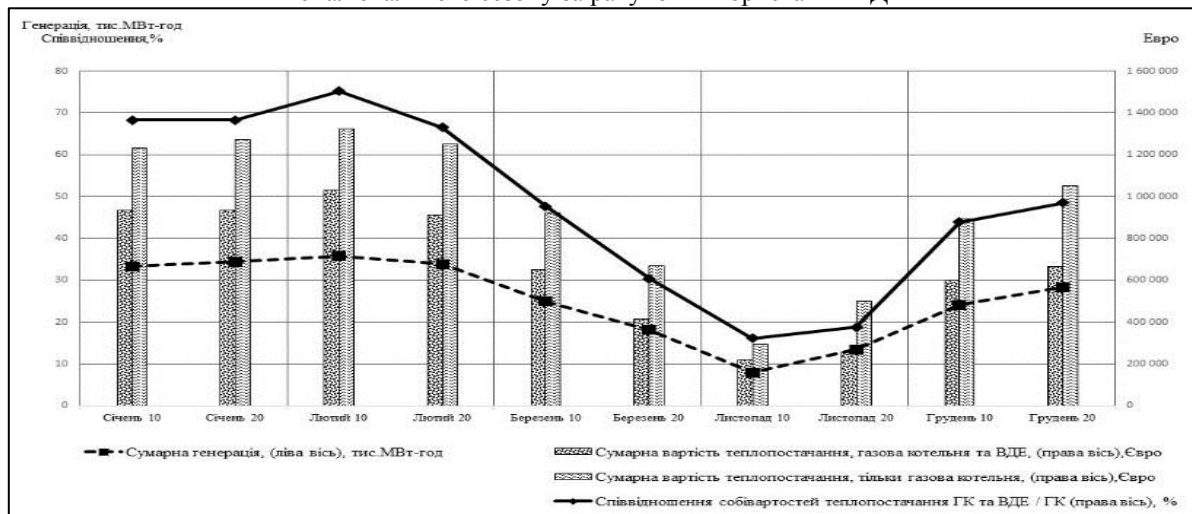


Рисунок 4 – Чисельні оцінки порівняльної ефективності використання ВДЕ в автономній системі тепlopостачання для характерних діб опалювального сезону

Список використаної літератури

1. Energy sources and sinks with short term local storages. URL: <http://www.flexynets.eu/en/Results>.
2. Pre-design support tool for low temperature DHC networks (manual). URL: <http://www.flexynets.eu/en/Results>.
3. Shurchkova Yu.A., Pidruchna A.O. Renewed technical– and– economic estimation of the efficiency of realization of projects of using geothermal energy. *Probl. zagal'n. energ.* 2020, 2(61):43-50. <https://doi.org/10.15407/pge2020.02.043>.
4. SolverStudio. URL: <https://solverstudio.org/> (Last accessed: 16.09.2022).
5. Climate and Average Weather Year Round at Stockholm-Bromma Airport. URL: <https://weatherspark.com/y/148401/Average-Weather-at-Stockholm-Bromma-Airport-Sweden-Year-Round/> (Last accessed: 28.10.2022).
6. Viktor Denysov. Software and information complex for district heat supply systems modeling. *System Research in Energy*. 2022. 1(70): 38–45.
7. ENTSO-E Generation Forecasts for Wind and Solar. URL: <https://transparency.entsoe.eu/generation/r2/dayAheadGenerationForecastWindAndSolar/show/> (last visited on February 04 2022).
8. Pre-design support tool for low-temperature DHC networks URL: <http://www.flexynets.eu/Download?id=file:56784400&s=3959528850507683308>.

V. Denysov¹, ORCID 0000-0002-3297-1114

¹General Energy Institute of The National Academy of Sciences of Ukraine

EFFICIENCY OF USING RENEWABLE ENERGY SOURCES FOR AN AUTONOMOUS HEAT SUPPLY SYSTEM

Projects for the integrated use of renewable energy sources were considered. The efficiency of using renewable energy sources in autonomous heat supply systems with minimal use of third-party energy sources and reducing the specific cost of hourly heat supply was assessed. A new software and information complex for modeling autonomous heat supply systems with minimal use of third-party energy sources was developed. With the help of the developed software and information complex, the optimized operating modes of the autonomous heat supply system were modeled and numerical estimates of the efficiency of using renewable energy sources in the system were obtained.

Keywords: renewable energy sources, heat supply system, operating mode, modeling, software package, energy saving

References

1. Energy sources and sinks with short term local storages. URL: <http://www.flexynets.eu/en/Results>.
2. Pre-design support tool for low temperature DHC networks (manual). URL: <http://www.flexynets.eu/en/Results>.
3. Shurchkova Yu.A., Pidruchna A.O. Renewed technical– and– economic estimation of the efficiency of realization of projects of using geothermal energy. *Probl. zagal'n. energ.* 2020, 2(61):43-50. <https://doi.org/10.15407/pge2020.02.043>.
4. SolverStudio. URL: <https://solverstudio.org/> (Last accessed: 16.09.2022).
5. Climate and Average Weather Year Round at Stockholm-Bromma Airport. URL: <https://weatherspark.com/y/148401/Average-Weather-at-Stockholm-Bromma-Airport-Sweden-Year-Round/> (Last accessed: 28.10.2022).
6. Viktor Denysov. Software and information complex for district heat supply systems modeling. *System Research in Energy*. 2022. 1(70): 38–45.
7. ENTSO-E Generation Forecasts for Wind and Solar. URL: <https://transparency.entsoe.eu/generation/r2/dayAheadGenerationForecastWindAndSolar/show/> (last visited on February 04 2022).
8. Pre-design support tool for low-temperature DHC networks URL: <http://www.flexynets.eu/Download?id=file:56784400&s=3959528850507683308>.

Надійшла: 30.01.2023

Received: 30.01.2023