

Енергоекономічна ефективність системи енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосною установкою в тепловій схемі промислово-опалювальної котельні

Ст. гр. ТЕ-15мн Лещенко В.В.

Керівник МКР: к. т. н., доц. Остапенко О. П.

- **Об'єкт дослідження** – енергоекономічна ефективність системи енергозабезпечення (СЕ) з когенераційно-теплонасосною установкою (КТНУ) малої потужності в тепловій схемі промислово-опалювальної котельні
- **Предмет дослідження** – процеси в елементах системи енергозабезпечення з КТНУ малої потужності, що забезпечують підвищення енергоекономічної ефективності системи енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосною установкою малої потужності в тепловій схемі промислово-опалювальної котельні.
- **Метою МКР** є підвищення енергоекономічної ефективності системи енергозабезпечення з КТНУ малої потужності, визначення енергоефективних режимів експлуатації системи енергозабезпечення з КТНУ малої потужності, оцінка обсягів економії енергоресурсів від застосування системи енергозабезпечення з КТНУ малої потужності в тепловій схемі промислово-опалювальної котельні.

Завдання МКР:

- визначення впливу джерел приводної енергії парокompресійних теплових насосів з врахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії до ТНУ на показники енергетичної ефективності парокompресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводом;
- оцінка енергетичної ефективності систем енергозабезпечення (СЕ) на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок (КТНУ) малої потужності з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокompресійних теплонасосних установок (ТНУ) малої потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії;
- оцінка обсягів економії енергоресурсів від впровадження системи енергозабезпечення з КТНУ малої потужності в тепловій схемі промислово-опалювальної котельні;
- проведення оптимізаційних енергоекономічних досліджень з метою визначення енергоефективних та економічно обґрунтованих режимів експлуатації систем енергозабезпечення з КТНУ малої потужності в теплових схемах промислово-опалювальних котелень;
- розробка методичних рекомендацій з оцінки та підвищення енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення з КТНУ малої потужності в теплових схемах промислово-опалювальних котелень,
- розробка рекомендацій з енергоефективних режимів експлуатації систем енергозабезпечення з КТНУ малої потужності в теплових схемах промислово-опалювальних котелень.

Наукова новизна:

- вперше досліджено, у зіставленні проаналізовано, а також визначено закономірності впливу джерел приводної енергії парокompресійних теплових насосів різних рівнів потужності з врахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії до ТН на значення безрозмірних показників енергетичної ефективності парокompресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводом;
- вперше запропоновано метод визначення областей енергоефективної та енергоекономічної роботи СЕ з КТНУ малої потужності та ПДТ за показником енергоекономічної ефективності з врахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії;
- дістали подальший розвиток методи прогнозування умов ефективної інтеграції парокompресійних ТНУ в промисловість та енергетику в частині визначення оптимальних енергоекономічних умов застосування КТНУ малої потужності з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних ТНУ, пікових джерел теплоти та втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії до ТНУ

Практичне значення одержаних результатів. Встановлено енергоекономічний ефект від застосування системи енергозабезпечення з КТНУ малої потужності в тепловій схемі промислово-опалювальної котельні.

Практична цінність роботи – визначено енергетичний та економічний ефект від застосування системи енергозабезпечення з КТНУ малої потужності в тепловій схемі промислово-опалювальної котельні, розроблено методичні рекомендації з оцінки та підвищення енергоекономічної ефективності системи енергозабезпечення з КТНУ малої потужності, розроблено рекомендації з енергоефективних режимів експлуатації системи енергозабезпечення з КТНУ малої потужності в тепловій схемі промислово-опалювальної котельні.

Методи дослідження – методом числового експерименту визначено енергоекономічну ефективність системи енергозабезпечення з КТНУ малої потужності в тепловій схемі промислово-опалювальної котельні. Енергоефективні режими роботи СЕ з КТНУ обчислювалися за розробленою програмою розрахунку ефективності СЕ з КТНУ, адекватність результатів якої підтверджено характеристиками ТНУ та ГПД за даними фірм-виробників.

Апробація результатів роботи.

Робота була представлена на трьох конкурсах:

- у II-му турі Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт в 2014/2015 н. р. та в 2015/2016 н. р в галузі «Енергетика» (2015 р. 2016 р., Маріуполь). В 2015/2016 н. р. робота відзначена дипломом 3-го ступеня.
- в загальноуніверситетському конкурсі науково-технічних ідей з напрямку «Енергозбереження» (ВНТУ, 2015 р.) та відзначена дипломом третього ступеня.
- Матеріали та результати досліджень доповідалися чотирнадцяти конференціях та конкурсах:
 - на шести міжнародних конференціях: на Міжнародній науково-технічній конференції "Інноваційні технології в будівництві" (Вінниця, 2014 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність в галузях економіки України» " (Вінниця, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи» (2015 р. 2016 р., Вінниця); Міжнародній науково-технічній конференції «Університетська наука» (2015 р. 2016 р., Маріуполь),
 - на чотирьох Всеукраїнських конференціях та конкурсах: на Міжвузівській науково-практичній студентській інтернет-конференції «Актуальні проблеми сучасної енергетики» (2015 р., Херсон); на Всеукраїнській науково-технічній конференції «Еколого-енергетичні проблеми сучасності» (2016 р., м. Одеса); у Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт в 2014/2015 н. р. та в 2015/2016 н. р в галузі «Енергетика» (2015 р. 2016 р., Маріуполь);
 - на чотирьох регіональних науково-технічних конференціях та конкурсі ВНТУ за напрямком «Енергозбереження».

Публікації. Результати проведених досліджень опубліковано в сімнадцяти наукових публікаціях: трьох наукових статтях [1-3] у фаховому виданні з Переліку ДАК України, яке входить до міжнародної наукометричної бази даних "РІНЦ" та чотирнадцяти тезах доповідей Міжнародних, Всеукраїнських та регіональних конференцій та конкурсів [4-17].

Показники енергетичної ефективності роботи ТНУ

- теоретичне значення коефіцієнта перетворення ждя ТНУ з ел. приводом

$$\varphi_m^{ел} = \frac{Q_{TH}}{N_{KM}}$$

- теоретичне значення коефіцієнта перетворення для ТНУ з когенераційним приводом

$$\varphi_T^{КТНУ} = \varphi_T + K_{ГПД}^T$$

- дійсне значення коефіцієнта перетворення

$$\varphi_D = \varphi_T \cdot \eta_{TH}$$

Безрозмірний показник енергетичної ефективності ТНУ

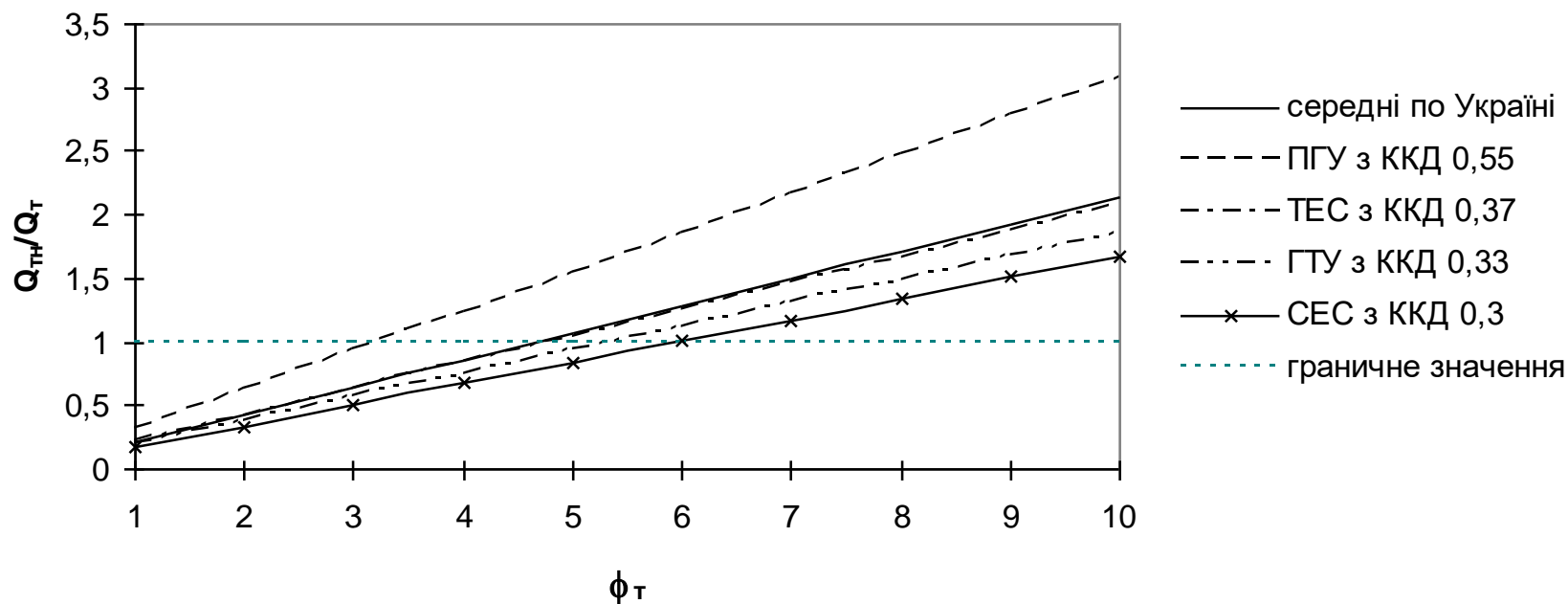
- для ТН з електроприводом:

$$Q_{\text{ТН}} / Q_{\text{Т}} = \eta_{\text{ЕЛ}} \cdot \varphi_{\text{Т}} \cdot \eta_{\text{ТШ}}$$

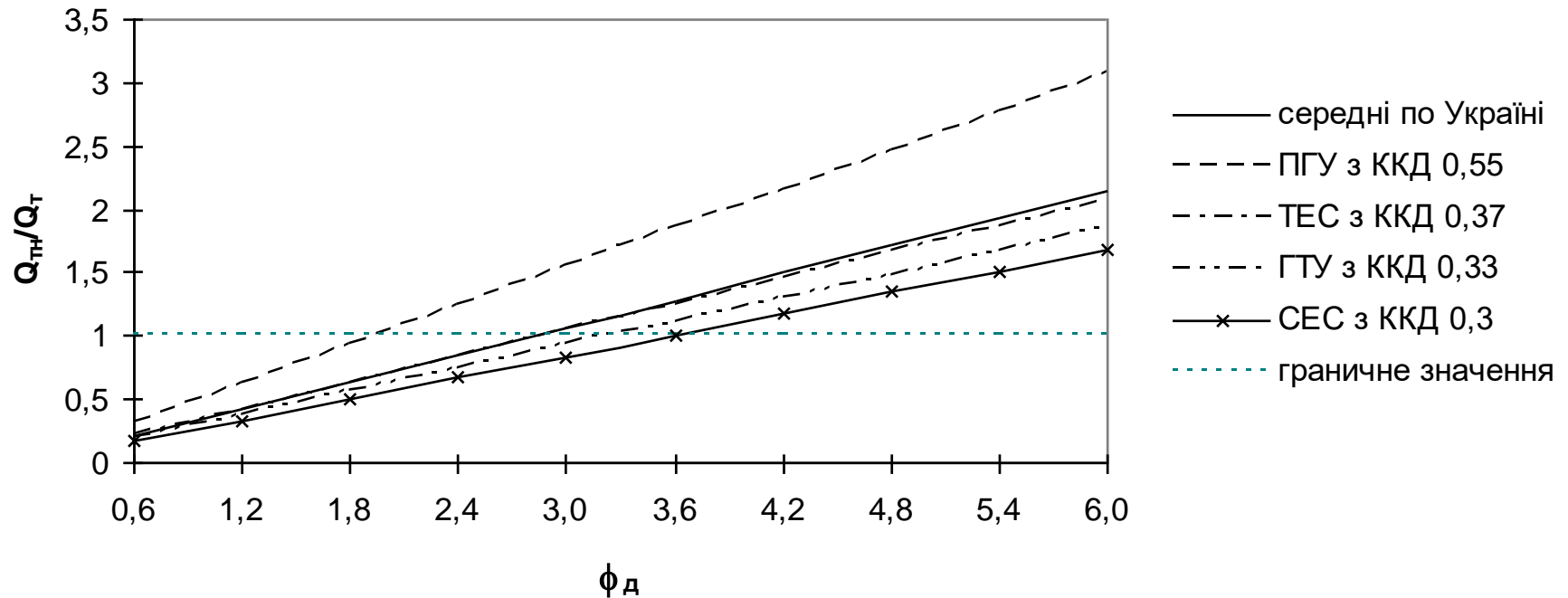
- для ТН з когенераційним приводом:

$$Q_{\text{ТН}} / Q_{\text{Т}} = \eta_{\text{ЕД}} \cdot \eta_{\text{ЕП}} \cdot \varphi_{\text{Т}} \cdot \eta_{\text{ТШ}}$$

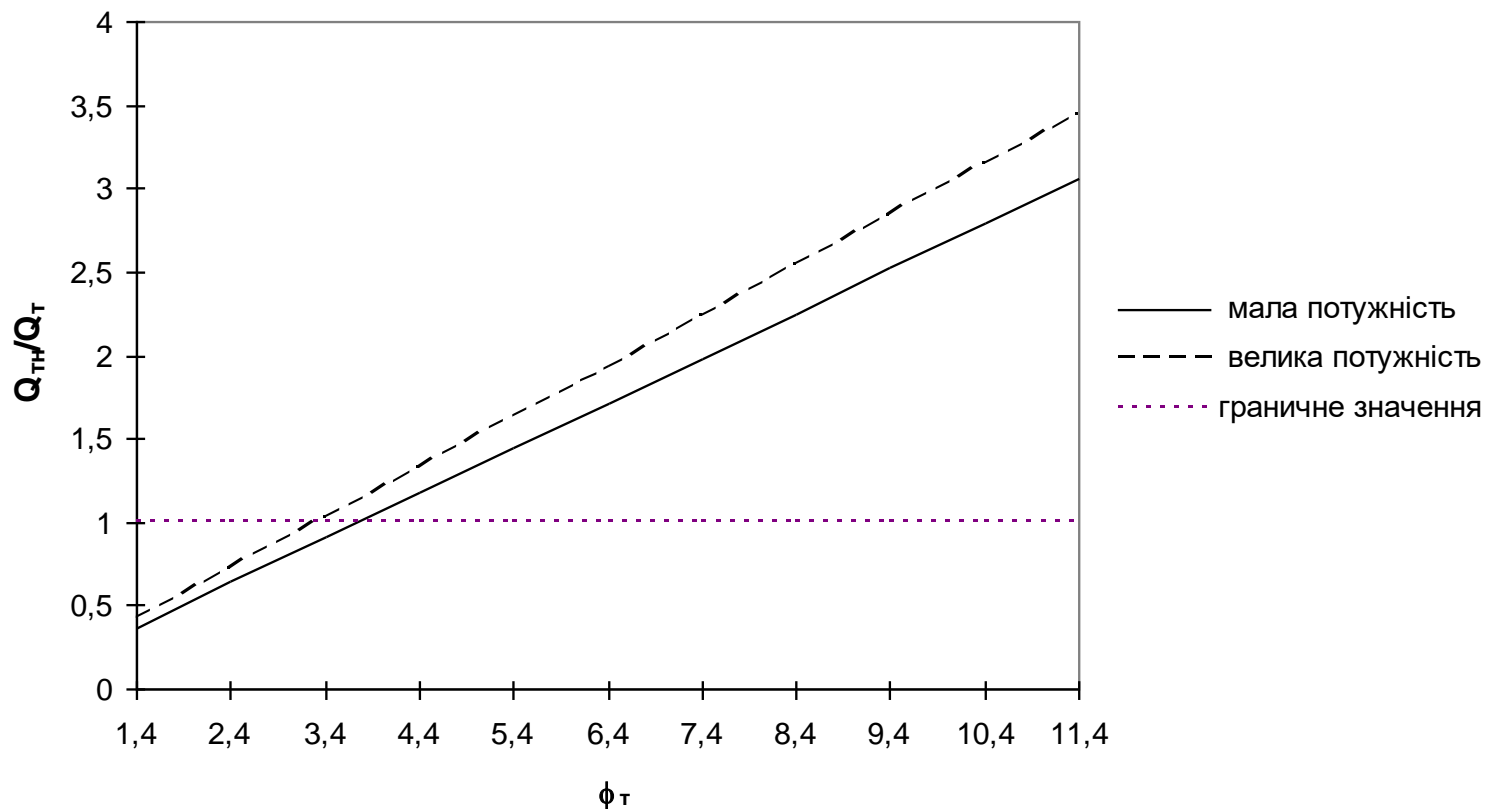
Значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з електроприводом для теплових насосів малої потужності в залежності від теоретичних значень коефіцієнта перетворення



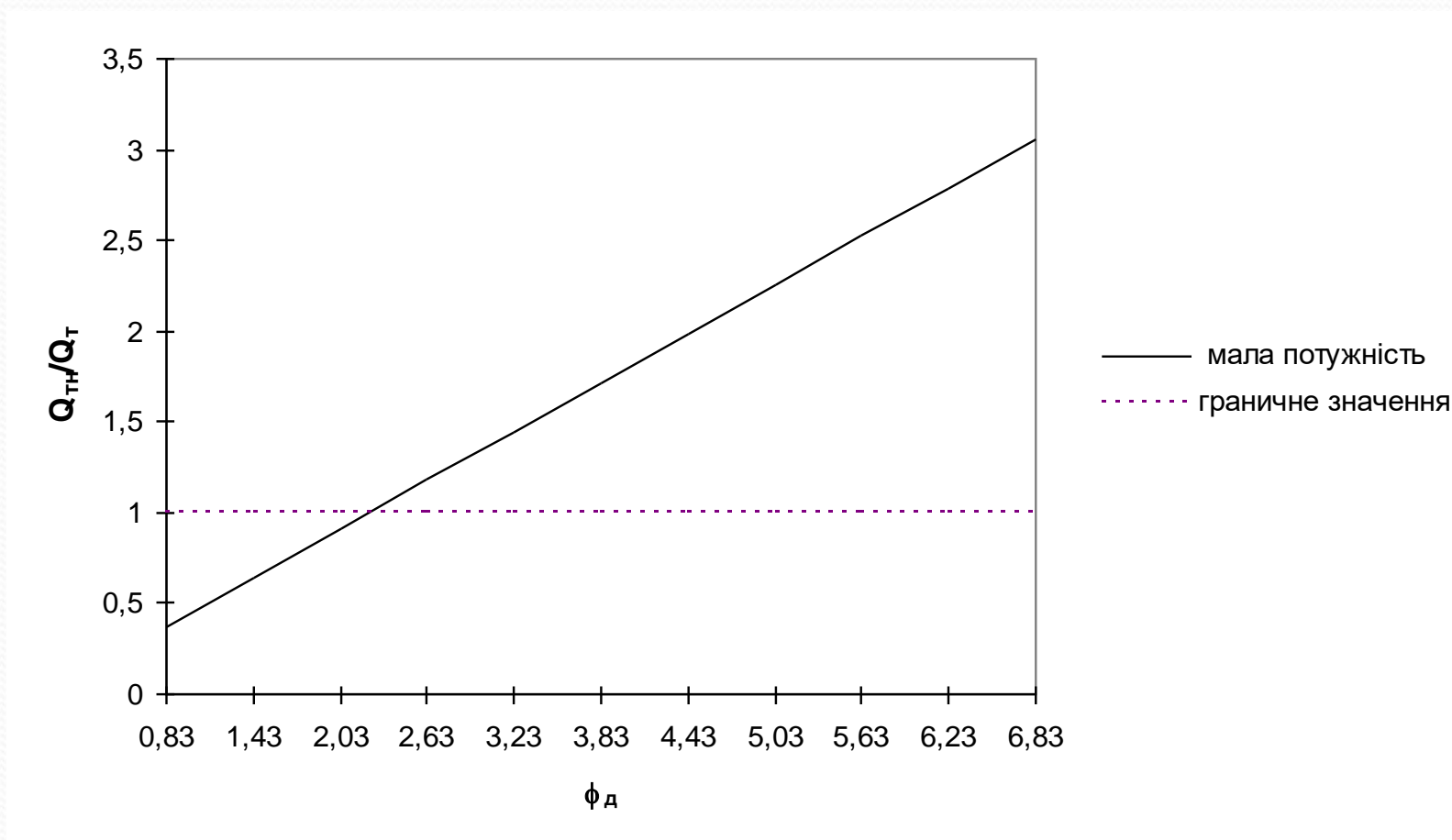
Значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з електроприводом для теплових насосів малої потужності в залежності від дійсних значень коефіцієнта перетворення



Значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з когенераційним приводом для теплових насосів малої та великої потужності в залежності від теоретичних значень коефіцієнта перетворення



Значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з когенераційним приводом для теплових насосів малої потужності в залежності від дійсних значень коефіцієнта перетворення



Показники енергетичної та енергоекономічної ефективності СЕ з КТНУ

- безрозмірний критерій енергетичної ефективності СЕ з КТНУ

$$K_{CE} = Q_{КТНУ} / Q_T = \eta_{ЕД} \cdot \eta_{ЕП} \cdot \varphi^{КТНУ} \cdot \eta_{ш}$$

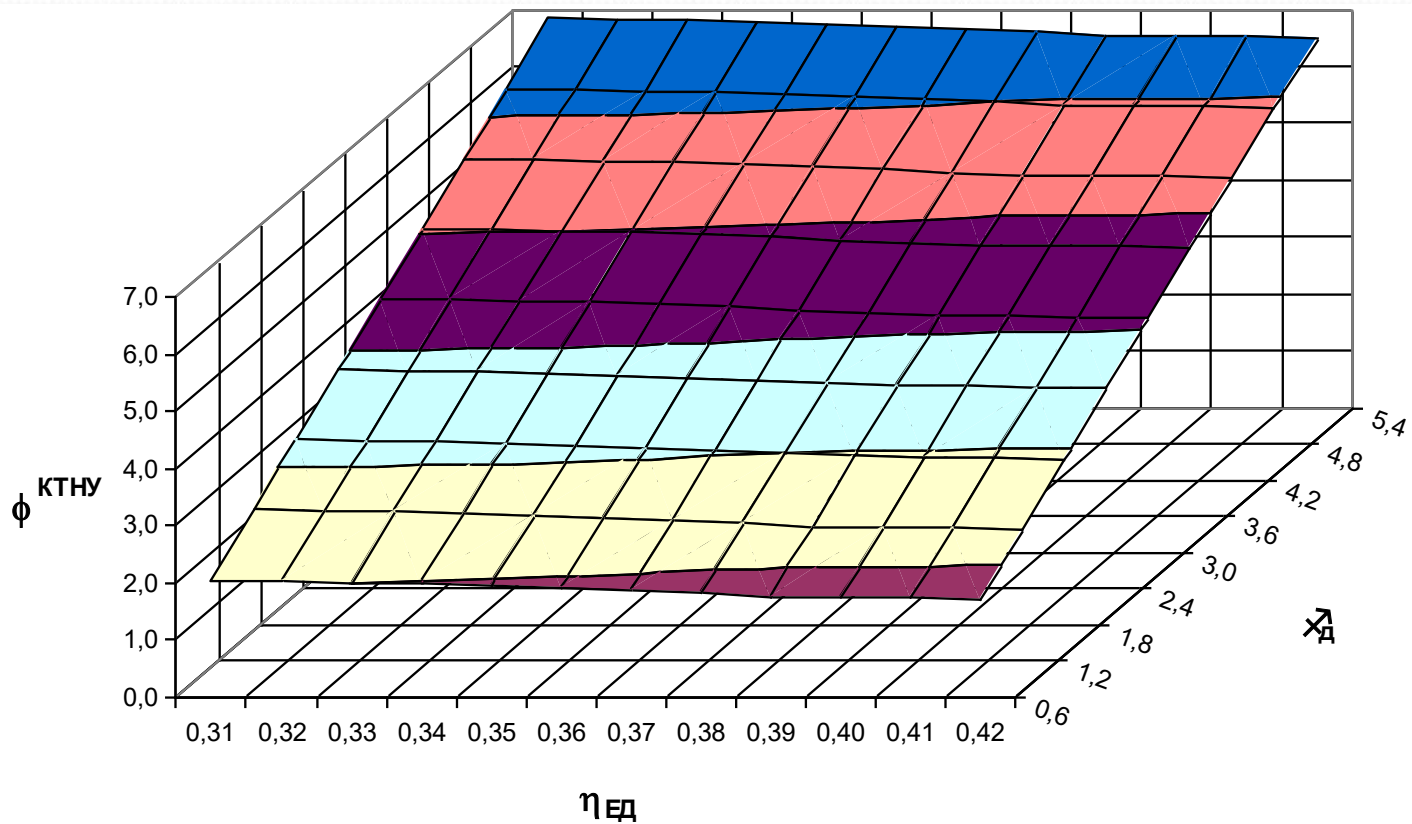
- безрозмірний критерій енергетичної ефективності СЕ з КТНУ та ПДТ

$$K_{CE1} = (1 - \beta) \cdot K_{ПДТ} + \beta \cdot K_{КТНУ}$$

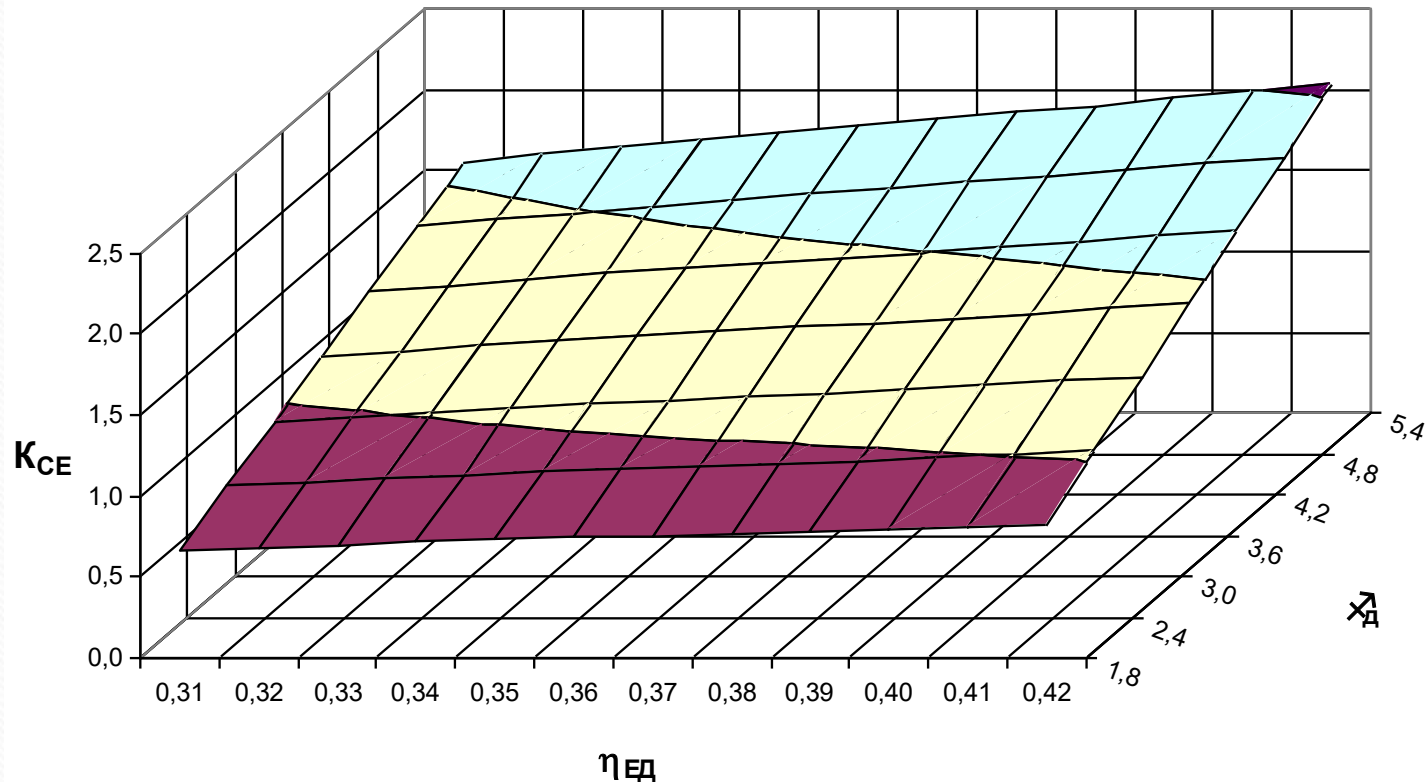
- комплексний узагальнений безрозмірний критерій енергоекономічної ефективності СЕ з КТНУ

$$K_{CE} = K_{CE1} + \Delta E_i = (1 - \beta) \cdot K_{ПДТ} + \beta \cdot K_{КТНУ} + \Delta E_i$$

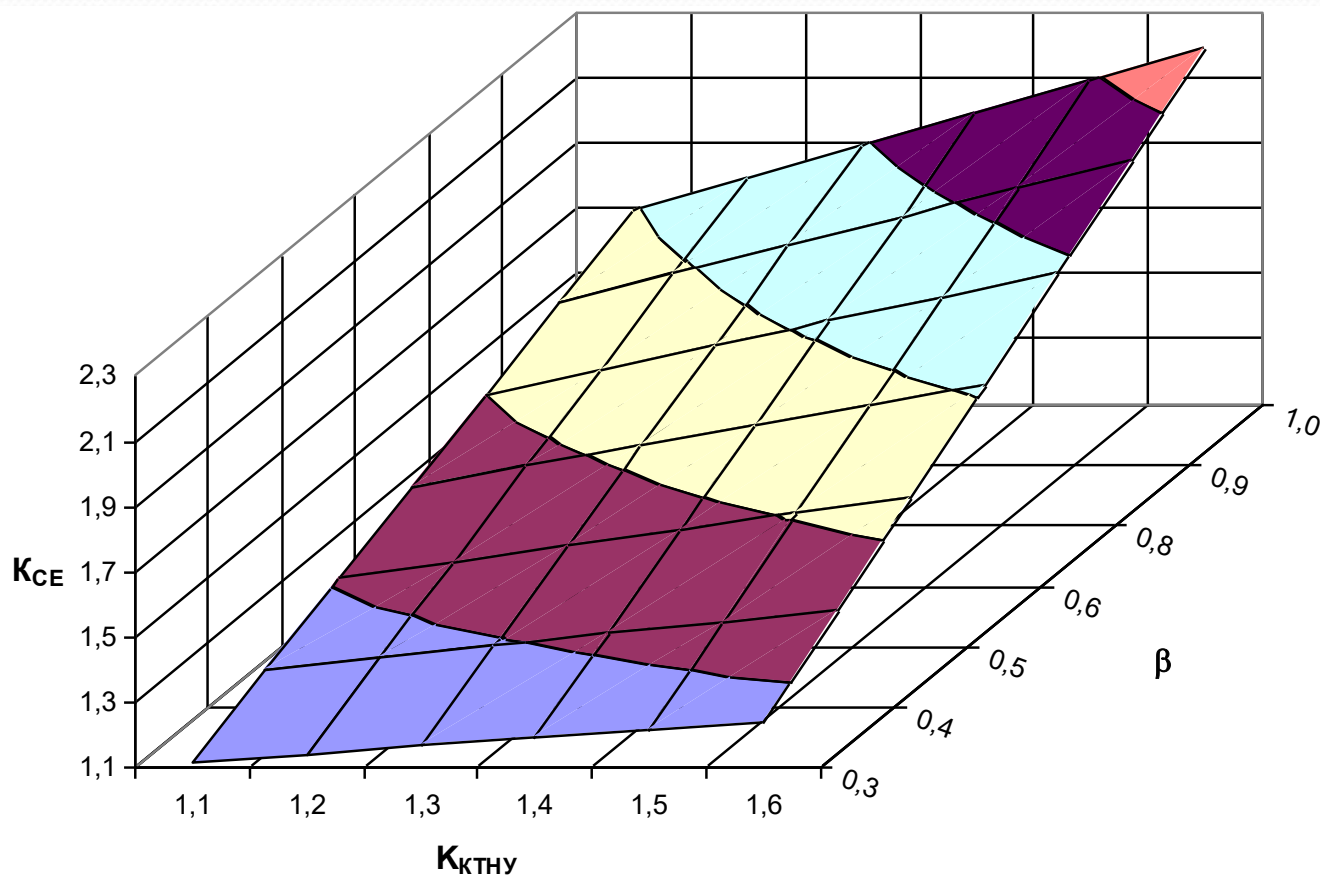
Значення дійсного коефіцієнта перетворення для СЕ на основі КТНУ малих потужностей в залежності від дійсних значень коефіцієнта перетворення ТНУ та ефективного ККД ГПД



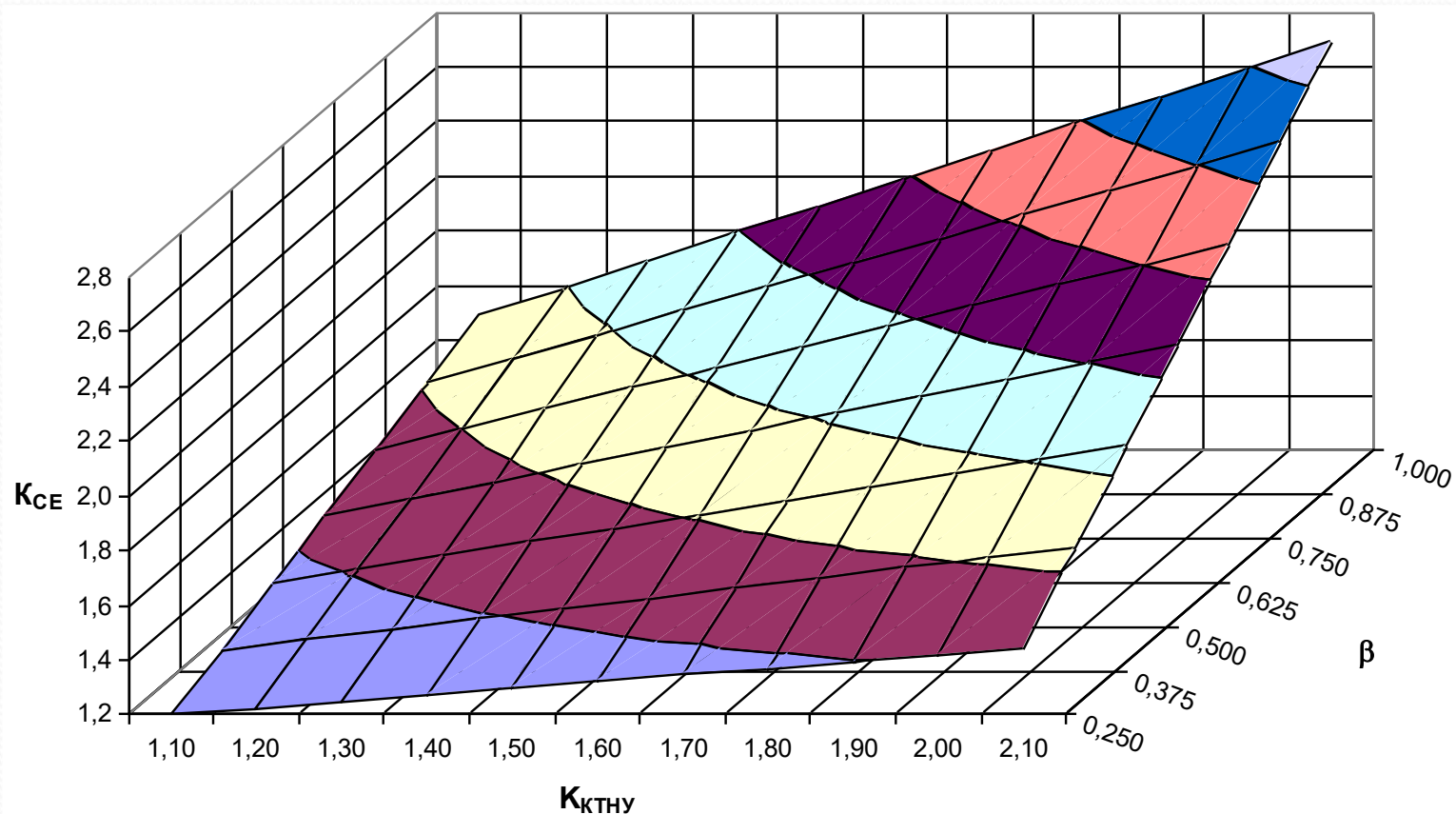
Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності для СЕ на основі КТНУ малих потужностей в залежності від дійсних значень коефіцієнта перетворення ТНУ та ефективного ККД ГПД



Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності, визначена за показником енергоекономічної ефективності СЕ з КТНУ, за умов мінімальної ефективності ГПД та пікового паливного котла



Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності, визначена за показником енергоекономічної ефективності СЕ з КТНУ, за умов максимальної ефективності ГПД та пікового паливного котла



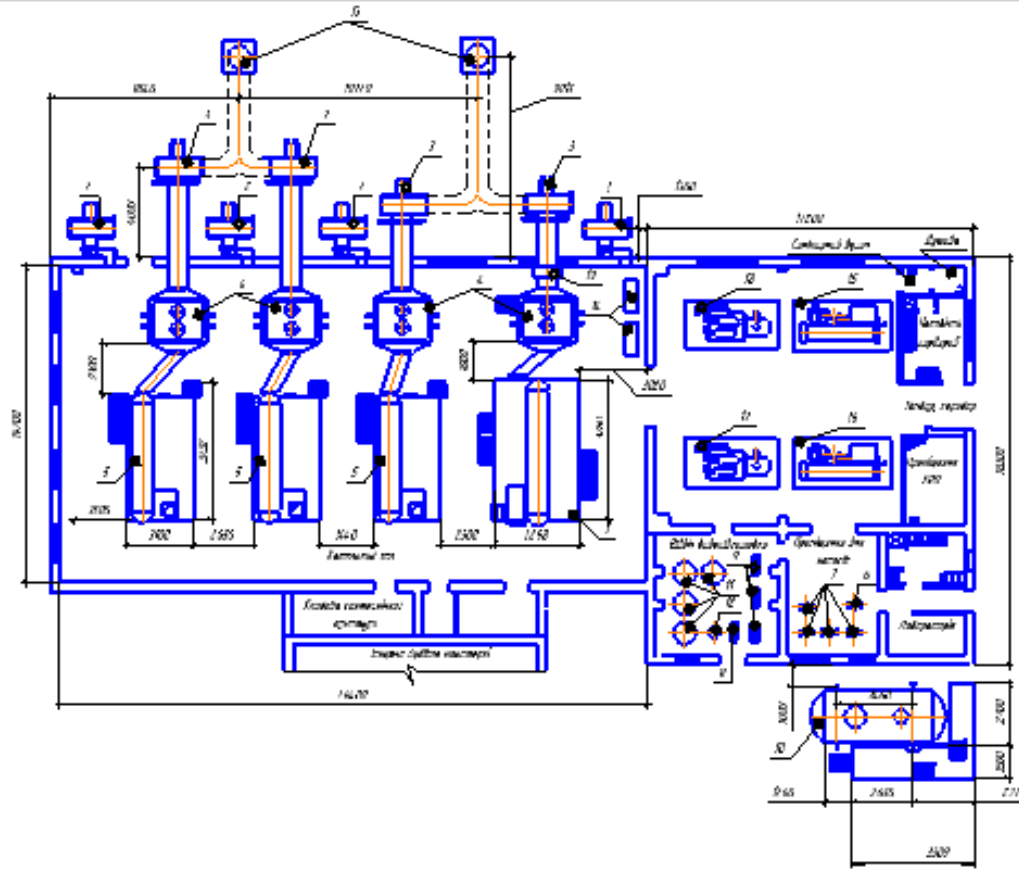
Ефективність варіантів застосування ТНУ в тепловій схемі

Показник	Одиниці вимірювання	Варіант застосування			
		1	2	3	4
Річна економія робочого палива	%	4,22	3,7	2,85	1,37
Економія робочого палива	тис.м ³ /рік	565,17	495,53	381,7	183,48
Кількість зекономлених коштів	млн. грн./рік	4,624	4,054	3,123	1,501

позначені такі варіанти:

- 1 – застосування ТНУ для забезпечення потреб опалення та гарячого водопостачання;
- 2 – застосування ТНУ для забезпечення гарячого водопостачання для двох сезонів;
- 3 – застосування ТНУ для забезпечення потреб опалення та гарячого водопостачання для другого сезону;
- 4 – застосування ТНУ для забезпечення гарячого водопостачання для першого сезону.

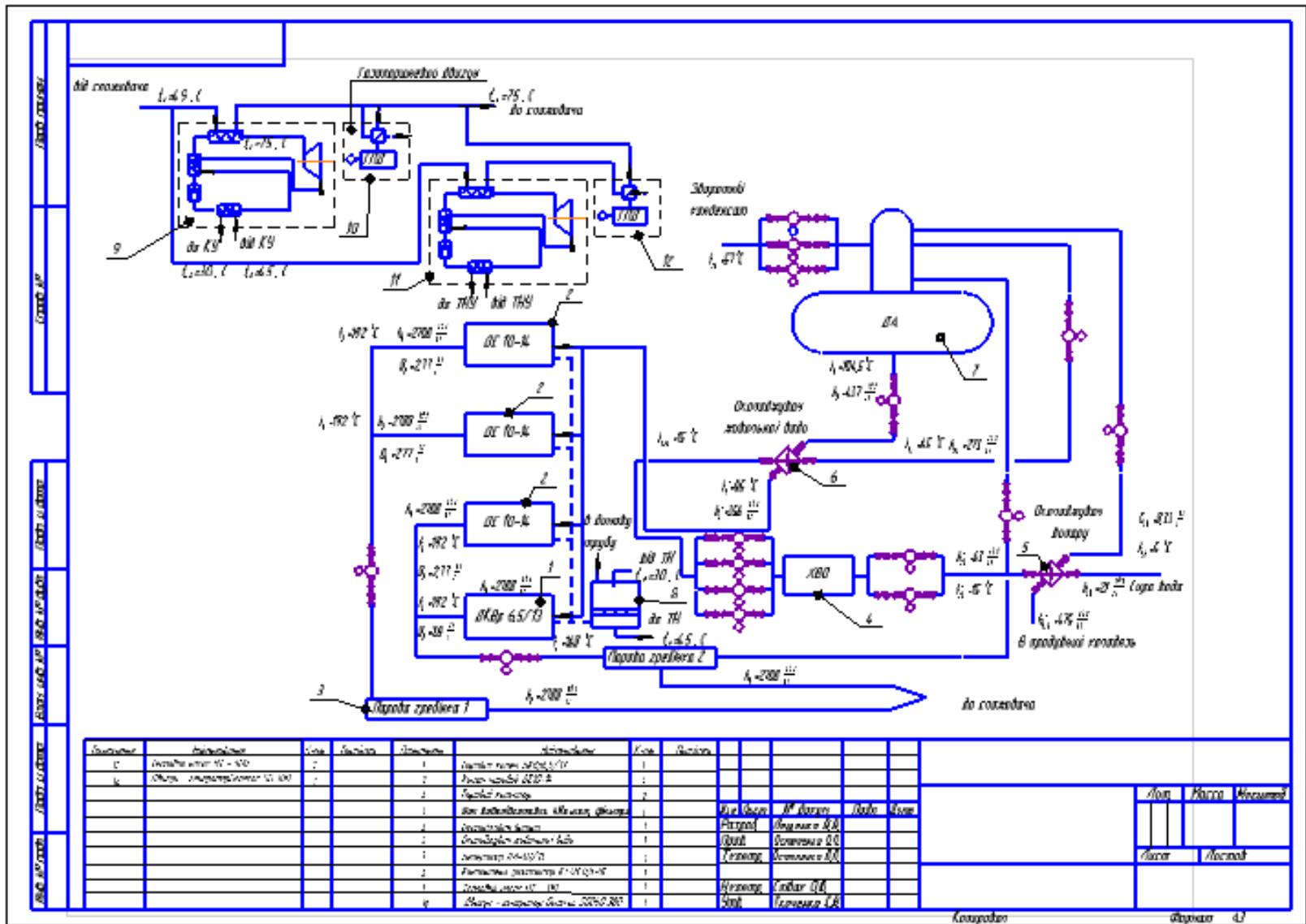
План котельні СЕ з КТНУ



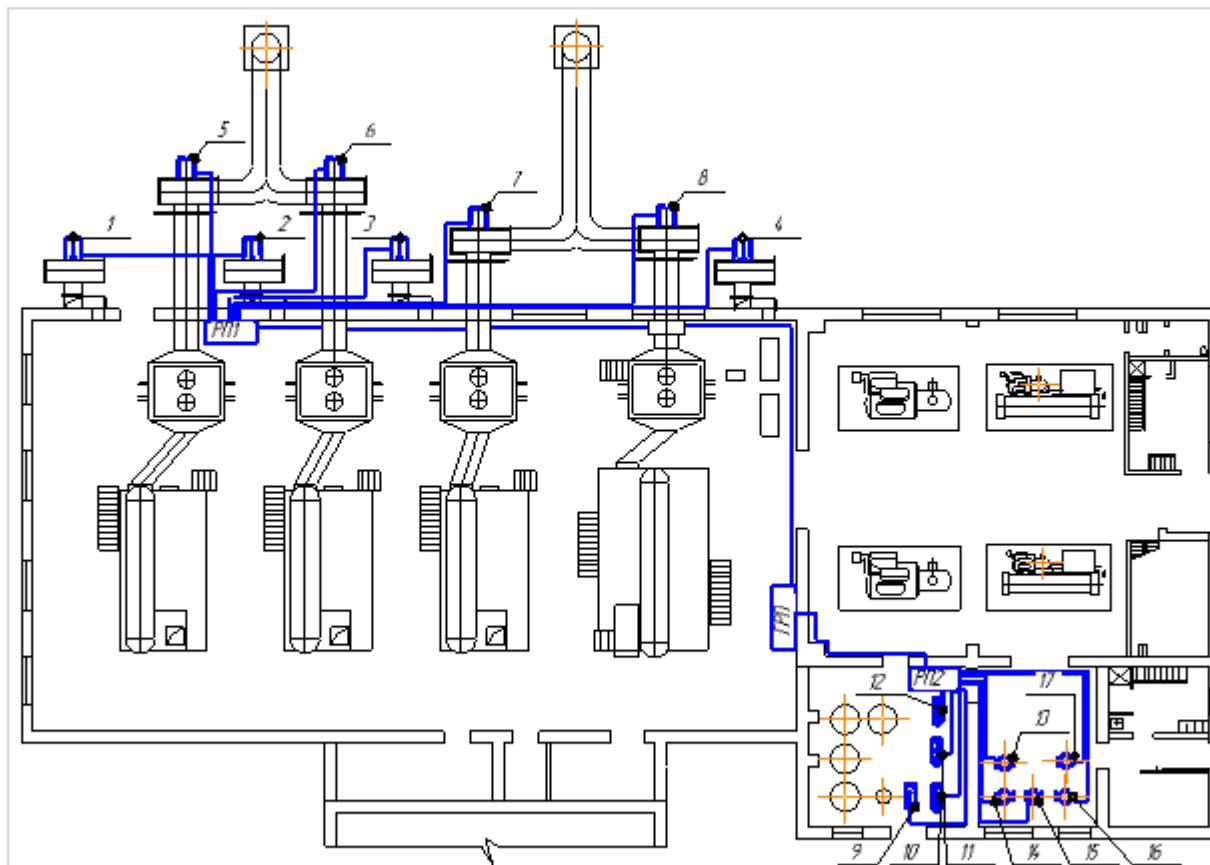
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

№ п/п	назва	к-ть	маса	№ п/п	назва	к-ть	маса	№ п/п	назва	к-ть	маса	№ п/п	назва	к-ть	маса	№ п/п	назва	к-ть	маса
1	Водяний насос	1	1000	1	Водяний насос	1	1000	1	Водяний насос	1	1000	1	Водяний насос	1	1000	1	Водяний насос	1	1000
2	Водяний насос	1	1000	2	Водяний насос	1	1000	2	Водяний насос	1	1000	2	Водяний насос	1	1000	2	Водяний насос	1	1000
3	Водяний насос	1	1000	3	Водяний насос	1	1000	3	Водяний насос	1	1000	3	Водяний насос	1	1000	3	Водяний насос	1	1000
4	Водяний насос	1	1000	4	Водяний насос	1	1000	4	Водяний насос	1	1000	4	Водяний насос	1	1000	4	Водяний насос	1	1000
5	Водяний насос	1	1000	5	Водяний насос	1	1000	5	Водяний насос	1	1000	5	Водяний насос	1	1000	5	Водяний насос	1	1000
6	Водяний насос	1	1000	6	Водяний насос	1	1000	6	Водяний насос	1	1000	6	Водяний насос	1	1000	6	Водяний насос	1	1000
7	Водяний насос	1	1000	7	Водяний насос	1	1000	7	Водяний насос	1	1000	7	Водяний насос	1	1000	7	Водяний насос	1	1000
8	Водяний насос	1	1000	8	Водяний насос	1	1000	8	Водяний насос	1	1000	8	Водяний насос	1	1000	8	Водяний насос	1	1000
9	Водяний насос	1	1000	9	Водяний насос	1	1000	9	Водяний насос	1	1000	9	Водяний насос	1	1000	9	Водяний насос	1	1000
10	Водяний насос	1	1000	10	Водяний насос	1	1000	10	Водяний насос	1	1000	10	Водяний насос	1	1000	10	Водяний насос	1	1000

Теплова схема котельні СЕ з КТНУ

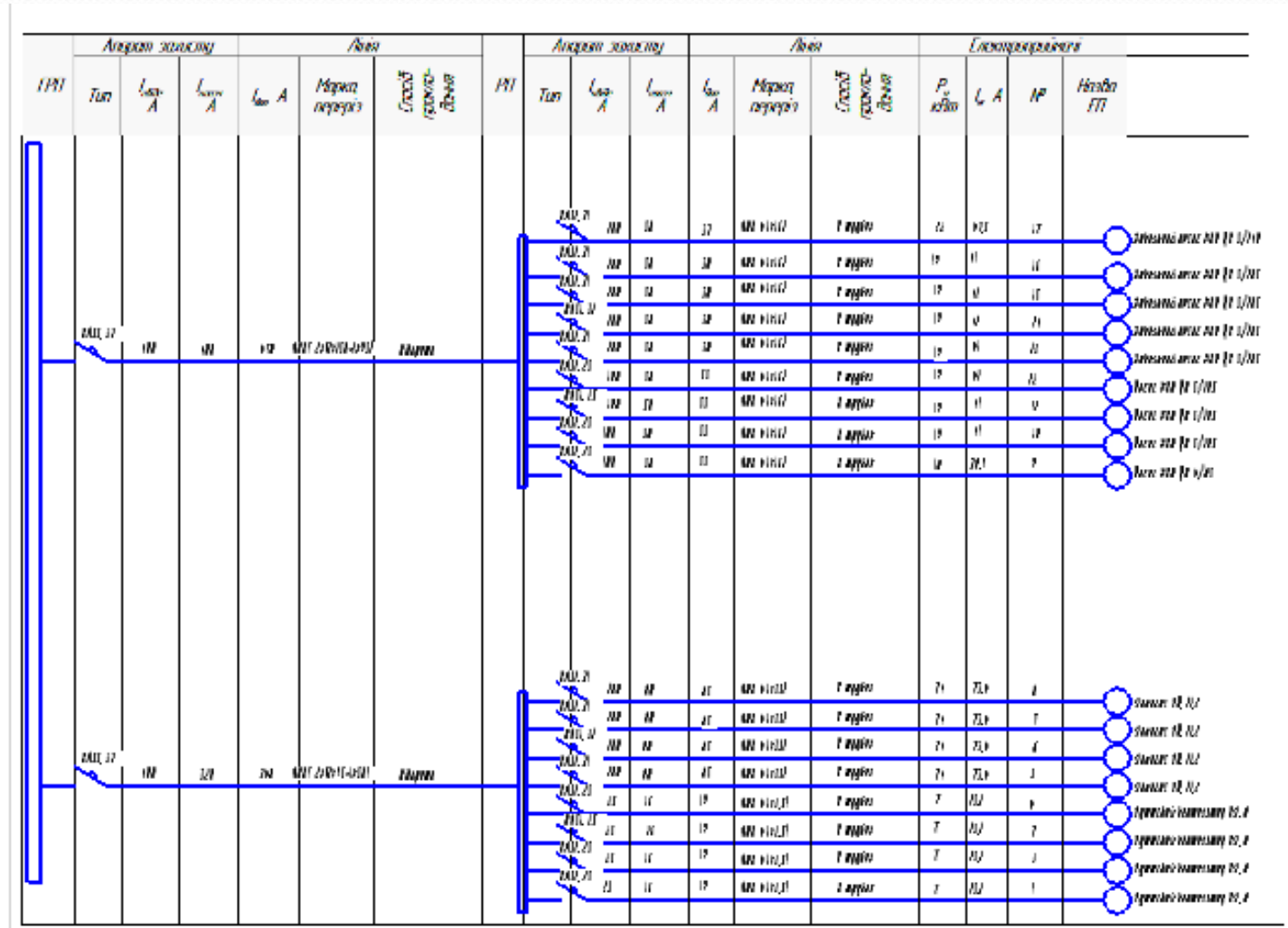


План електропостачання промислово-опалювальної котельні



Лист 1

Схема електропостачання промислово-опалювальної котельні



ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Показник	Одиниця вимірювання	Варіант схеми	
		Існуюча схема	Модернізована схема з <u>когенераційною</u> ТНУ
Витрата робочого палива	тис. м ³ /рік	9073,08	8507,91
Економія робочого палива	тис. м ³	---	565,17
Витрати на паливо	<u>млн.грн./рік</u>	74,243	69,619
Експлуатаційні витрати	<u>млн.грн./рік</u>	82,375	78,211
Зменшення експлуатаційних витрат	<u>млн.грн./рік</u>	----	4,164
Капіталовкладення в нове обладнання	<u>млн.грн.</u>	----	9,284
Термін окупності нового обладнання	років	----	2,3

Висновки

- 1) Оцінено енергоекономічну ефективність системи енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосною установкою в тепловій схемі промислово-опалювальної котельні.
- 2) Запропоновано підхід із оцінювання енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок малих потужностей з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокompресійних ТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.
- 3) Розроблено методичні основи та здійснено оцінку енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок малої потужності, визначенні ефективні режими роботи систем енергозабезпечення на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокompресійних ТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.
- 4) Запропонований підхід з оцінювання енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення на основі КТНУ має низку переваг:
 - дозволяє оцінювати вплив змінних режимів роботи КТНУ з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії;
 - враховує режими роботи парокompресійних ТНУ;
 - враховує вплив джерел приводної енергії парокompресійних ТНУ різних рівнів потужності з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії в КТНУ;
 - враховує енергетичну ефективність систем енергозабезпечення на основі КТНУ малої потужності;
 - запропоновані методичні основи можуть бути використані для оцінювання енергетичної ефективності систем енергозабезпечення на основі КТНУ з різними холодоагентами, джерелами низькотемпературної теплоти та схемними рішеннями ТНУ.

- 5) Розроблено методичні основи та визначено області енергоефективної та енергоекономічної роботи СЕ з КТНУ малої потужності і ПДТ, за умов оптимальних режимів роботи КТНУ; визначені енергоефективні режими роботи СЕ з КТНУ та ПДТ з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокompресійних ТНУ малої потужності, з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.
- 6) Запропонований підхід із визначення областей енергоефективної та енергоекономічної роботи СЕ з КТНУ та ПДТ за показником енергоекономічної ефективності має низку переваг:
 - враховує змінні режими роботи СЕ зі зміною розподілу навантаження між парокompресійними КТНУ та піковим джерелом теплоти в СЕ;
 - дозволяє оцінювати комплексний вплив змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти СЕ, джерел приводної енергії парокompресійних КТНУ з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії;
 - враховує вплив джерел приводної енергії парокompресійних КТНУ малих потужностей з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії в КТНУ та СЕ;
 - враховує вплив пікових джерел теплоти для СЕ та виду споживаної ними енергії з урахуванням втрат енергії при генеруванні та постачанні енергії до пікових джерел теплоти;
 - в результаті комплексного підходу до оцінювання енергоефективності СЕ можна здійснити вибір найбільш ефективного ПДТ для певного виду СЕ;
 - запропоновані в методичні основи та приведені результати досліджень можуть бути використані для визначення областей енергоефективної роботи СЕ на основі парокompресійних КТНУ малої потужності з різними холодоагентами, джерелами низькотемпературної теплоти та схемними рішеннями;
 - дозволяє визначити області та режими енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності та ПДТ, за яких енергоефективність досліджуваних СЕ майже в два рази перевищує енергоефективність сучасних вискоелективних електричних та паливних котлів;
 - дозволяє комплексно оцінювати енергоефективність значної кількості варіантів СЕ з КТНУ малої потужності та ПДТ;
 - дозволяє розробити рекомендації з енергоефективної експлуатації СЕ з КТНУ малої потужності та ПДТ з різними схемними рішеннями за показником енергоекономічної ефективності..

7) Визначено, що:

- за умов $\beta > 1$ та $\beta >$ та режимів енергоефективної роботи КТНУ, в дослідженні визначено області енергоефективної роботи та енергоефективні режими роботи СЕ з КТНУ малої потужності та піковими паливними котлами для різних рівнів енергоефективності елементів СЕ;
- запропоновані в дослідженні СЕ з КТНУ малої потужності та пікових паливними котлами будуть енергоефективними, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме $\beta > 0,25 \dots 0,3$. У разі виконання цієї умови сучасні вискоефективні електричні та паливні котли будуть поступатися за енергоефективністю вказаним СЕ. За цих умов зазначені СЕ можуть бути рекомендовані як вискоефективні системи енергозабезпечення, оскільки їх ефективність більш, ніж в два рази перевищує енергоефективність вискоефективних електричних та паливних котлів.
- 8) Практичні рекомендації по застосуванню СЕ з КТНУ містять оцінку ефективності СЕ з КТНУ, розробку технології монтажу і автоматизації СЕ з КТНУ. Система автоматизації регулює такі параметри: температуру води на виході з конденсатора та температуру води на виході з випарника.
- 9) У разі встановлення когенераційних ТНУ в тепловій схемі промислово-опалювальної котельні забезпечується середньорічна економія робочого палива на 4,22 %, за рахунок чого буде знижено собівартість теплоти від 321,6 грн./ГДж до 305,34 грн./ГДж. Річна економія коштів на паливо від спорудження ТНС складе 4,624млн/грн.. Термін окупності встановлення когенераційних ТНУ становить 2,2 роки.
- 10) Запропоновані підходи із визначення областей енергоефективної та енергоекономічної роботи СЕ з КТНУ малої потужності і ПДТ дозволяють визначити енергоефективні режими роботи та розробити рекомендації з енергоефективної експлуатації СЕ з різними схемними рішеннями, з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокompресійних ТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.