

**Висновки.** В межах території України виділяється 4 нафтогазоносних провінції: Дніпровсько-Прип'ятська, Балтійско-Предобруджська, Карпатська та Причорноморсько-Північно-Кавказько-Мангизшакська. В даний час в Україні у промисловій розробці знаходиться більше 250 нафтових і газових родовищ. Усі родовища покриті мережею свердловин різного призначення. Наприклад, тільки у 4-х цехах Прилуцького НГВУ Чернігівської області нараховується більше 20-ти газових і нафтових родовищ загальним фондом 780 свердловин. Щорічно певна кількість не тільки окремих свердловин, а й цілих родовищ виводиться з експлуатації через виробленість покладів. Глибока наукова і конструкторсько-технологічна розробка даної технології використання такого

матеріального ресурсу в змозі привести до практичного створення нового виду відновлюваних джерел енергії – макроакумуляторів теплової енергії.

1. *Забарный Г.Н., Шурчков А.В., Барило А.А., Резакова Т.А., Шпак Я.Ф.* Геотермальное теплоснабжение посёлка Мостиска Львовской области. – НАН Украины, ИТТФ, Киев, 2003. – С. 36–37.

2. *Шурчков А.В., Соколов О.О.* Декларацийний патент України № 38890 Експлуатація поодиноких геотермальних свердловин. – бюл. № 4. – 2001 р.

3. *Басок Б.И., Авраменко А.О., Кужель Л.М.* Гідродинаміка і теплообмін в одиночному теплообміннику типу труба в трубі системи свердловина – ґрунт // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31. – №1. – С. 21–27.

4. *Басок Б.И., Резакова Т.А., Коломейко Д.А., Матвеев Ю.Б.* // Когенерация в децентрализованной и возобновляемой энергетике. – Киев: ИТТФ НАН Украины, 2013. – 408 с.

УДК 621.577.4:621.311.22:697.34

**М.Ю.Швець** (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

### **Експериментальне визначення кількості скидної теплоти системи охолодження генератора ТВВ-320 №1 Київської ТЕЦ-6, що може бути використана для теплових насосів**

*Проведено експериментальне визначення кількості скидної теплоти системи охолодження генератора ТВВ-320 №1 Київської ТЕЦ-6, що може бути використана для теплопостачання за допомогою теплових насосів. Видано рекомендації з вибору потужності теплових насосів та оцінено економію палива при їх роботі.*

**Ключові слова:** ТЕЦ, тепловий насос, експериментальне дослідження, тепла енергія, коефіцієнт трансформації.

*Выполнено экспериментальное определение количества сбросной теплоты системы охлаждения генератора ТВВ-320 №1 Киевской ТЭЦ-6, которая может быть использована для теплоснабжения с помощью тепловых насосов. Выданы рекомендации по выбору мощности тепловых насосов и оценена экономия топлива при их работе.*

**Ключевые слова:** ТЭЦ, тепловой насос, экспериментальное исследование, тепловая энергия, коэффициент трансформации.

В статі [1] на прикладі ТЕЦ-6 м. Києва нами була оцінена можливість використання скидної теплоти водозворотних циклів на основі теплонасосних технологій для підігріву мережевої води. В роботах [2, 3] проведено енергетичну та економічну оптимізацію, в результаті чого було запропоновано найбільш ефективну технологічну схему включення теплових насосів (ТН) в існуючу схему Київської ТЕЦ-6 та визначено найбільш економічні режими сумісної експлуатації ТЕЦ-6 і теплових насосів, що дало можливість підвищен-

ня коефіцієнта трансформації теплових насосів. В роботах [1–3] було запропоновано встановити чотири ТН потужністю 18 МВт, при цьому використовувалась уся скидна теплота ТЕЦ-6, що потребувало значних капіталовкладень. Для обґрунтування доцільності використання ТН на ТЕЦ в якості пілотного проекту було запропоновано встановити ТН потужністю декілька МВт з мінімальними монтажними затратами та високими експлуатаційними характеристиками (коефіцієнтами трансформації). За даними критеріями

було обрано систему охолодження обмоток генератора та збудника генератора.

Метою даної роботи була необхідність оцінити кількість скидної теплоти Київської ТЕЦ-6, котра віддається циркуляційній воді в результаті охолодження обмоток генератора та збудника генератора (рис. 1). Для цього було вирішено провести експериментальне дослідження роботи системи охолодження генератора енергоблоку №1 при різних навантаженнях та оцінити кількість теплоти і похибку її визначення.

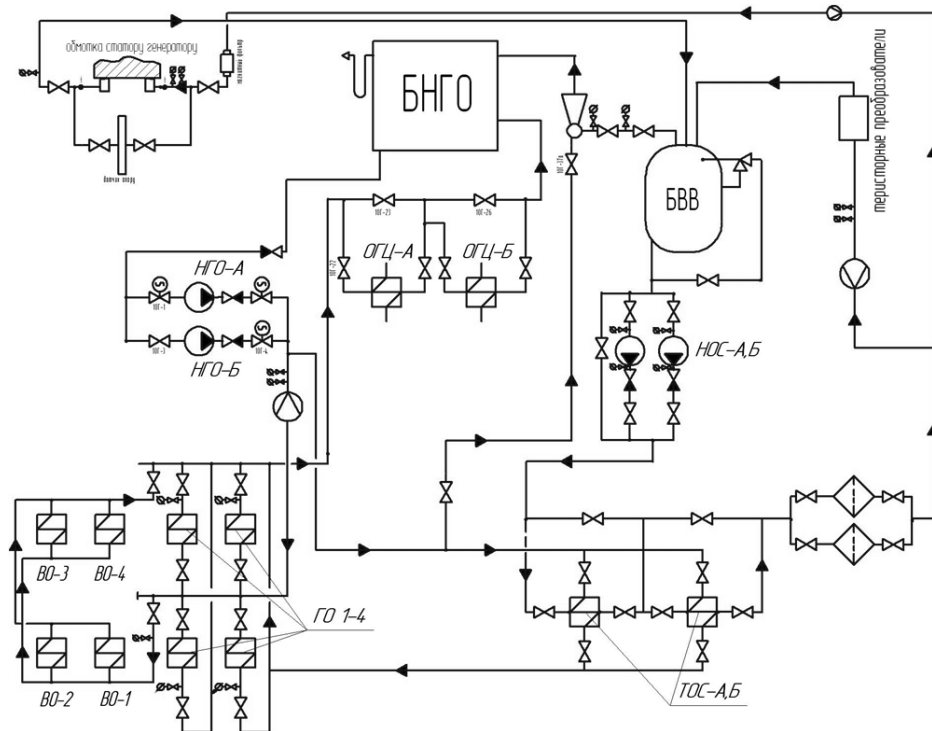
В генераторі ТВВ-320 №1 енергоблоку 250/300 МВт для охолодження ротора використовується водневе охолодження, для охолодження статора – водяне охолодження (система НОС). Система збудження має повітряну систему охолодження.

Водневе охолодження генератора та повітряне охолодження збудника віддає свою теплоту воді системи НГО через газо- та повітроохолоджувачі, а вода НГО через теплообмінники ОГЦ – циркуляційній воді (рис. 2). Кількість теплоти, що необхідна для охолодження генератора, залежить від його активної та реактивної потужності. Діапазон зміни активної потужності знаходиться в межах від 140 до 250 МВт, а реактивної від –30 до 180 МВ·А(р). За опалювальний сезон 2014/2015 року було проведено збір експериментальних даних роботи системи охолодження генератора при різних навантаженнях.

Результатом даної роботи будуть рекомендації щодо вибору потужності теплових насосів замість теплообмінників ОГЦ, а також оцінка роботи даних ТН.

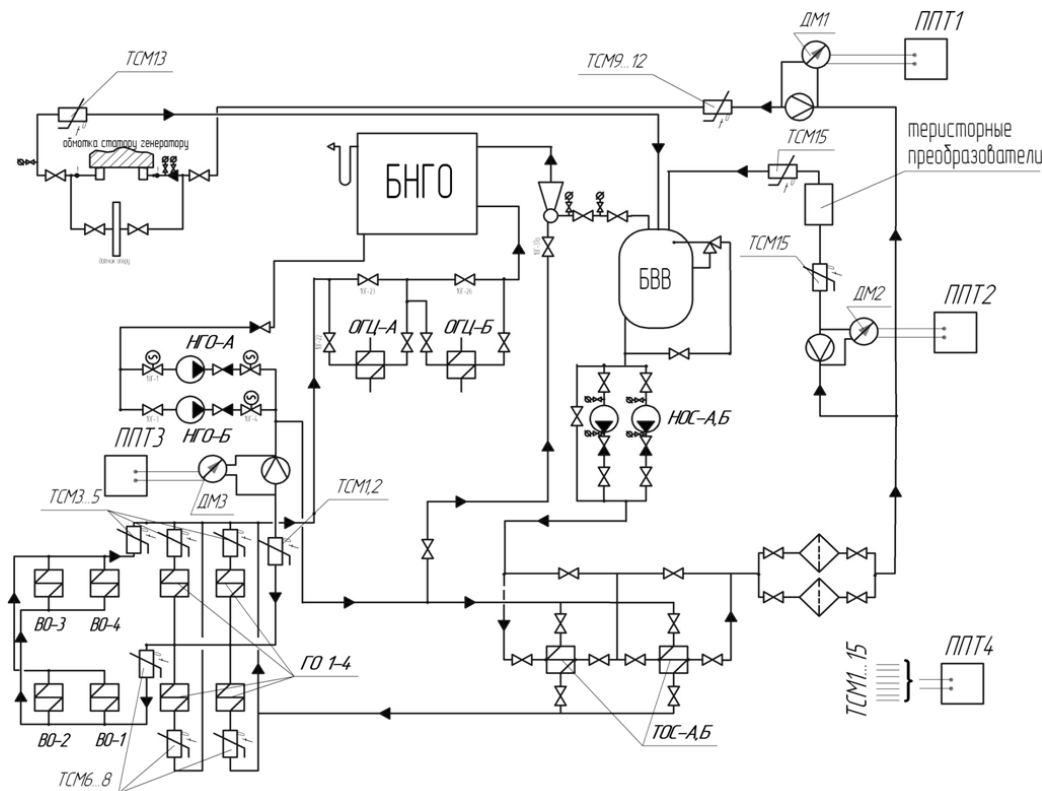


Рис. 1. Генератор та збудник генератора блоку №1 Київської ТЕЦ-6.



**Рис. 2.** Технологічна схема системи охолодження генератора ТВВ-320 енергоблоку №1 Київської ТЕЦ-6: БНГО – бак насосів НГО; БВВ – бак вакуумно-водяний; ВО1-4 – повітроохолоджувачі збуджувача; ГО1-4 – газоохолоджувачі генератора №1-4; НГО А,Б – насоси газоохолоджувачів; НОС А,Б – насоси охолодження статора; ОГЦ А,Б – охолоджувач води НГО циркуляційною водою; ТОС А,Б – теплообмінники системи охолодження статора.

Схема системи охолодження генератора ТВВ-320 енергоблоку №1 має технологічну вимірювальну схему, що зображена на рис. 3, яка входить у систему автоматичного контролю генератора (САТГ).



Позн.	Найменування	Кіл.	Примітка
ПРТ1...4	Потенціометр постійного струму	4	
ТСМ1...15	Мідний термометр опору	15	ТСМ-100М
ДМ1...3	Диференційний манометр	3	ДМ 3583М

**Рис. 3.** Вимірювальна схема системи охолодження генератора ТВВ-320 енергоблоку №1 Київської ТЕЦ-6.

В результаті досліджень буде визначено залежність кількості скидної теплоти системи охолодження генератора від його активної та реактивної потужності:

$$Q_{OXL}^G = f(N; Q), \quad (1)$$

де  $N$ ,  $Q$  – активна та реактивна потужність, МВт, МВА(р).

Кількість скидної теплоти системи охолодження генератора визначається як сума скидної теплоти системи охолодження: газоохолоджувачів (ГО), статора, тиристорних перетворювачів:

$$Q_{OXL}^G = Q_{OXL}^{GO} + Q_{OXL}^C + Q_{OXL}^T. \quad (2)$$

При експериментальному дослідженні кількість скидної теплоти системи газоохолоджувачів, статора і тиристорних перетворювачів визначається за формулами [4]:

$$Q_{OXL}^{GO} = G_{OXL}^{GO} c (t_{GO}'' - t_{GO}') = G_{OXL}^{GO} c (T1 - T5), \quad (3)$$

$$Q_{OXL}^C = G_{OXL}^C c (t_C'' - t_C') = G_{OXL}^C c (T13 - T9), \quad (4)$$

$$Q_{OXL}^T = G_{OXL}^T c (t_T'' - t_T') = G_{OXL}^T c (T15 - T14), \quad (5)$$

де  $G_{OXL}^{GO}$ ,  $G_{OXL}^C$ ,  $G_{OXL}^T$  – експериментальна витрата охолоджуваної води через газоохолоджувачі, статор генератора, тиристорні перетворювачі, кг/с;  $c$  – теплоємність води,  $4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;  $T1-T15$  – експериментальні температури №1-15, К.

**Аналіз похибки експерименту.** Було обчислено похибку експериментального визначення скидної теплоти охолодження генератора Київської ТЕЦ-6 та проаналізовано можливість її зниження.

Похибка визначення відносного значення  $N$  та  $Q$  складає 1%.

Відносна та абсолютна похибки визначення скидної теплоти охолодження генератора ( $Q_{OXL}^G$ ) обчислюються за формулами [5]:

$$\delta(Q_{OXL}^G) = \frac{\Delta Q_{OXL}^{GO} + \Delta Q_{OXL}^C + \Delta Q_{OXL}^T}{Q_{OXL}^{GO} + Q_{OXL}^C + Q_{OXL}^T}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{OXL}^{GO} &= Q_{OXL}^{GO} \cdot \delta(Q_{OXL}^{GO}) = \\ &= Q_{OXL}^{GO} \sqrt{\delta(G_{OXL}^{GO})^2 + \delta(c)^2 + \delta(T1 - T5)^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Відносна похибка визначення витрати через газоохолоджувачі:

$$\begin{aligned} \delta(G_{OXL}^{GO}) &= \sqrt{\delta_T^2 + \delta_{n.np}^2 + \delta_{em.np}^2} = \\ &= \sqrt{2^2 + 1^2 + 3,47^2} = 4,13\%, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $\delta_T$ ,  $\delta_{n.np}$ ,  $\delta_{em.np}$  – похибка тарування витратомірної шайби, первинного та вторинного приладу відповідно.

$$\delta_{em.np} = \frac{A_M \cdot \gamma_{np}}{A} = \frac{1250 \cdot 1}{370} = 3,47\%, \quad (8a)$$

де  $A_M$  – шкала приладу, 1250 т/год;  $A$  – значення виміру, 370 т/год;  $\gamma_{np}$  – приведена похибка приладу (клас точності), 1,0%.

В результаті аналізу було визначено, що найбільша похибка з'являлась при визначенні різниці температур. Для зменшення даної похибки було проведено експеримент при роботі системи охолодження генератора в умовах відключення від електромережі та відсутності обертів турбіни; при цьому відсутнє виділення теплоти з генератора ( $Q_{OXL}^G = f(0; 0) = 0$ ), а різниця температур повинна дорівнювати 0. В даному режимі було знято значення всіх температур та визначено їх різницю, що дозволило перейти від похибки визначення різниці температур до оцінки похибки визначення температур:

$$\begin{aligned} \delta(T1 - T5) &= \sqrt{\delta_{ук}^2 + \delta_{n.np}^2 + \delta_{em.np}^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{0,05}{3} \cdot 100\right)^2 + 0,5^2 + 0,5^2} = 1,81\%, \end{aligned} \quad (9)$$

тоді  $\delta(Q_{OXL}^{GO}) = 4,57\%$ .

Аналогічно було визначено похибку  $\delta(Q_{OXL}^C) = 3,14\%$  та  $\delta(Q_{OXL}^T) = 3,54\%$ .

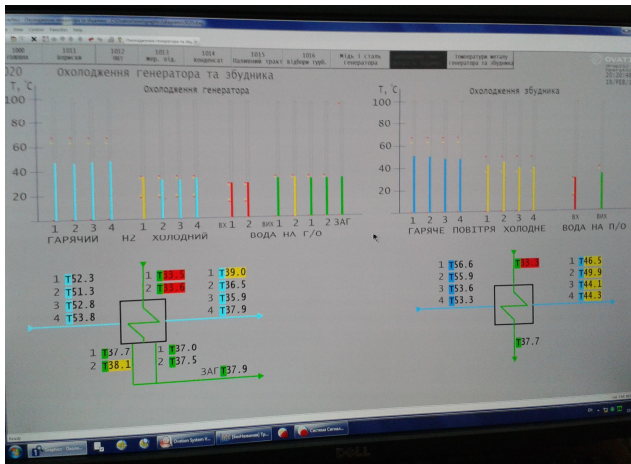
Тоді загальна похибка визначення теплоти системи охолодження генератора за формулою (6) буде така:

$$\delta(Q_{OXL}^G) = 4,35\%.$$

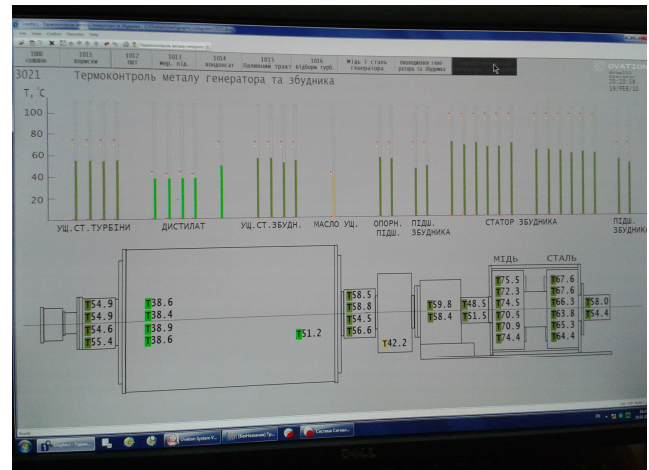
**Збір даних експерименту.** Дані експерименту збиралися при роботі енергоблоку №1 Київської ТЕЦ у період з 8.01.15 до 1.04.15 при різних значеннях активної та реактивної потужності енергоблоку (рис. 4) з системи автоматичного контролю температур генератора (АСКТГ) (рис. 5а, б). Дані знімалися при стабілізації навантажень і температур (критерієм стабілізації була відсутність зміни активного навантаження, зміна реактивного – не більше 1 МВА(р) протягом 10 хвилин).



Рис. 4. Панель БЩК ТЕЦ-6 блоку №1 з показами активної та реактивної потужності енергоблоку.



а)



б)

Рис. 5. Вікна системи автоматичного контролю температур генератора (АСКТГ) з даними.

В таблиці 1 наведено експериментальні дані при різних навантаженнях енергоблоку.

Таблиця 1. Експериментальні дані (вибірка) при різних навантаженнях енергоблоку

Вхідні дані		Експериментальні температури							
потужність генератора		температура газоохолоджувачів, °С			температура дистилляту статора, °С			температура дистилляту ТП, °С	
активна, МВт	реактивна, МВАр	T1	T2	T5	T9	T11	T13	T14	T15
0	0	28,2	28,2	28,3	27,9	27,7	28	27,8	27,9
140	-30	24,3	24,4	27,6	27	26,7	32,8	26,9	32,7
150	30	27,3	27,3	30,6	30	29,9	36,4	30	36,3
250	42	33,5	33,6	37,9	38,6	38,4	51,2	38,6	51,1
250	120	32,9	32,9	37,6	38,5	38,2	52,5	38,5	52,4

На основі експериментальних даних було проведено розрахунки та визначено кількість скидної теплоти системи охолодження генератора ТВВ-320 №1 Київської ТЕЦ-6 при різних навантаженнях. Дані наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Розрахункові дані кількості скидної теплоти системи охолодження генератора ТВВ-320 №1 Київської ТЕЦ-6 при різних навантаженнях

Потужність генератора		Теплова потужність системи охолодження, кВт			
активна, МВт	реактивна, МВАр	газоохолоджувачів	статора	ТП	загальна
0	0				
140	-30	1252,17	215,59	28,95	1496,70
150	30	1272,04	234,39	31,48	1537,91
250	42	1689,43	468,78	62,95	2221,16
250	120	1828,56	522,68	70,19	2421,42

**Рекомендації щодо вибору потужності теплових насосів замість теплообмінників ОГЦ, а також оцінка роботи даних ТН.** При екстраполяції експериментальних даних було визначено максимальну кількість скидної теплоти системи охолодження генератора, яка складає біля 2,7-2,8 МВт у робочому діапазоні навантажень.

Для оцінки коефіцієнта трансформації для теплового насоса використаємо напівемпіричну формулу Мартиновського [6]:

$$\varphi = 0,74 \frac{T_2}{T_1 - T_2} - (0,0032T_2 + 0,765 \frac{T_2}{T_1}) + 0,9, \quad (10)$$

де  $T_1, T_2$  – температура в конденсаторі та випарнику теплового насоса, К;

$$T_1 = T_{3,B} + \frac{\varphi \cdot W^{TH}}{2 \cdot c \cdot G_{M,B}} + \Delta T_K; \quad (10a)$$

$$T_2 = T_{ЦВ} - \frac{(\varphi - 1)W^{TH}}{2 \cdot c \cdot G_{ЦВ}} - \Delta T_B, \quad (10б)$$

де  $T_{3,B}, T_{ЦВ}$  – температура відповідно зворотної мережевої та циркуляційної води, К;  $Q_T^{TH}, W^{TH}$  – теплова потужність та потужність приводу компресора теплового насоса, Вт;  $G_{M,B}, G_{ЦВ}$  – витрата відповідно мережевої та циркуляційної води через ТН, кг/с;  $c$  – теплоємність води, Дж/(кг·К);  $\Delta T_K, \Delta T_B$  – температурний напір конденсатора та випарника ТН, К, прийнятий 5 К.

Згідно з розрахунками, при максимальній потужності системи охолодження генератора 3 МВт, максимальній температурі зворотної води в тепломережі 55°C та води після газоохолоджувачів 33°C коефіцієнт трансформації для теплового насоса дорівнює 5,05, а необхідна потужність компресора ТН становить 750 кВт. При знижен-

ні потужності системи охолодження генератора і температури зворотної води тепломережі коефіцієнт трансформації для теплового насоса зростає.

**Висновки.** Проведено експериментальні дослідження роботи системи охолодження генератора енергоблоку №1 при різних навантаженнях, оцінено кількість теплоти і похибку її визначення.

Видано рекомендації щодо вибору потужності теплових насосів замість теплообмінників ОГЦ: необхідна потужність компресора ТН становить 750 кВт. Згідно з розрахунками коефіцієнт трансформації для теплового насоса може становити від 5 до 6 в залежності від температури зворотної води тепломережі та води після газоохолоджувачів. Теплова потужність ТН в залежності від навантажень становить від 1,8 до 3,6 МВт.

1. Басок Б.И., Швець М.Ю. и др. Оценка возможности использования сбросной теплоты водооборотных конденсационных циклов на основе теплонасосных технологий (на примере ТЭЦ-6 г. Киева) // Пром. теплотехника. – 2010. – Т. 35. – №6. – С. 76–83.

2. Швець М.Ю. Оптимізація сумісної експлуатації Київської ТЕЦ-6 та теплових насосів, що використовують її скидну теплоту. Постановка задачі // Відновлювана енергетика. – 2013. – № 2. – С. 68–73.

3. Швець М.Ю. Оптимізація сумісної експлуатації Київської ТЕЦ-6 та теплових насосів, що використовують її скидну теплоту. Розв'язок задачі // Відновлювана енергетика. – 2013. – № 4. – С. 69–74.

4. Осипова В.А. Экспериментальное исследование методов теплообмена. – М: Энергия, 1979. – 271 с.

5. Методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине "Исследование теплофизических свойств веществ". Б.В. Латенко, В.И. Коньшин – К.: КПИ, 1986. – 242 с.

6. Мартыновский В.С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов / Под ред. В. М. Бродянского. – М: Энергия, 1979. – 288 с.